No 191 (191) (2026)

The scientific heritage
(Budapest, Hungary)
The journal is registered and published in Hungary.
The journal publishes scientific studies, reports and reports about achievements in different scientific fields.
Journal is published in English, Hungarian, Polish, Russian, Ukrainian, German and French.
Articles are accepted each month.
Frequency: 24 issues per year.
Format - A4
ISSN 9215 — 0365

All articles are reviewed
Free access to the electronic version of journal
Edition of journal does not carry responsibility for the materials published in a journal.
Sending the article to the editorial the author confirms it's uniqueness and takes full responsibility for possible consequences for breaking copyright laws

Chief editor: Biro Krisztian
Managing editor: Khavash Bernat

- Singula Aleksandra - Professor, Department of Organization and Management at the University of Zagreb (Zagreb, Croatia)
- Bogdanov Dmitrij - Ph.D., candidate of pedagogical sciences, managing the laboratory (Kiev, Ukraine)
- Chukurov Valeriy - Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Biochemistry of the Faculty of Physics, Mathematics and Natural Sciences (Minsk, Republic of Belarus)
- Torok Dezso - Doctor of Chemistry, professor, Head of the Department of Organic Chemistry (Budapest, Hungary)
- Filipiak Pawel - doctor of political sciences, pro-rector on a management by a property complex and to the public relations (Gdansk, Poland)
- Flater Karl - Doctor of legal sciences, managing the department of theory and history of the state and legal (Koln, Germany)
- Bence Orban - Doctor of sociological sciences, professor of department of philosophy of religion and religious studies (Miskolc, Hungary)
- Feld Ella - Doctor of historical sciences, managing the department of historical informatics, scientific leader of Center of economic history historical faculty (Dresden, Germany)
- Owczarek Zbigniew - Doctor of philological sciences (Warsaw, Poland)
- Gál Jenő - MD, assistant professor of history of medicine and the social sciences and humanities (Budapest, Hungary)
- Borbély Kinga - Ph.D, Professor, Department of Philosophy and History (Kosice, Slovakia)
- Eberhardt Mona - Doctor of Psychology, Professor, Chair of General Psychology and Pedagogy (Munich, Germany)
- Kramarchuk Vyacheslav - Doctor of Pharmacy, Department of Clinical Pharmacy and Clinical Pharmacology (Vinnytsia, Ukraine)

«The scientific heritage»
Editorial board address: Budapest, Kossuth Lajos utca 84,1204
E-mail: public@tsh-journal.com
Web: www.tsh-journal.com

CONTENT

AGRICULTURAL SCIENCES

Hafizov G.
SWEET CHERRY (PRUNUS AVIUM L.) AS A SEASONAL DIETARY FRUIT WITH A HIGH RISK OF MICROBIOLOGICAL SPOILAGE.....4

BIOLOGICAL SCIENCES

Burak L., Samankova N.
GRAIN GERMINATION: PHYTOCHEMICAL ALTERATIONS AND IMPACT ON METABOLIC HEALTH 10

ECONOMIC SCIENCES

Dmytriiev I., Shevchenko I.
RANKING OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS IN UKRAINE BASED ON THE RESULTS OF STATE CERTIFICATION OF SCIENTIFIC ACTIVITY.....23

HISTORICAL AND ARCHEOLOGICAL SCIENCES

Mysko S.
FORMATION AND DEVELOPMENT OF THE DEPARTMENTAL AWARD SYSTEM OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE (1996–2014).....31

JURIDICAL SCIENCES

Parkheta V.
SOME ISSUES OF CRIMINOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ESPECIALLY GRAVE CRIMINAL OFFENCES AGAINST LIFE AND HEALTH 38

MEDICAL SCIENCES

Ias O.
LEFT-CHEEK SKIN HYDRATION ASYMMETRY AND ITS RELATIONSHIP TO VISUAL FACIAL AGING: DATA FROM A PILOT BIOIMPEDANCE STUDY IN FLORIDA WOMEN 42

Karimov M., Normuradova N.
ECHOCARDIOGRAPHIC ASSESSMENT OF THE MORPHOFUNCTIONAL PARAMETERS OF THE FETAL HEART IN HEMOLYTIC ANEMIA.....47

Usmanova M., Normuradova N.
MORPHOFUNCTIONAL PARAMETERS OF THE FETAL HEART AND FETAL ECHOCARDIOGRAPHY PROTOCOL IN PREGNANCIES COMPLICATED BY MATERNAL GESTATIONAL DIABETES MELLITUS.....51

PHILOLOGICAL SCIENCES

Bayramova N.
CHARACTERISTICS OF THE USE OF SUBORDINATING CONJUNCTIONS IN VARIOUS TYPES OF SUBORDINATE CLAUSES 55

PHYSICS AND MATHEMATICS

Milyuvene V., Milyus A., Milyute E.
GEOMETRIC AND HYDRODYNAMIC MODEL OF A UNIFIED ELLIPSOIDAL VORTEX WITH A CENTRAL CONCAVE KERN AND PRESERVED FILAMENT CHIRALITY.....63

TECHNICAL SCIENCES

Khlystun M.
ARCHITECTURAL MODELS FOR ENSURING UNIFIED USER ACCESS TO AI ACCELERATORS IN SELF-SERVICE CLOUD ENVIRONMENTS 78

Otkidach I.
ANALYSIS OF LATENCY AND RESPONSE VARIABILITY OF SERVICES ON LINUX PLATFORMS 84

Poliakov B., Pashko A.
MODEL OF EMPIRICAL CONSTRAINTS ON DESIGN DECISIONS IN AUTOMATED SOFTWARE DEVELOPMENT SYSTEMS 90

AGRICULTURAL SCIENCES

SWEET CHERRY (PRUNUS AVIUM L.) AS A SEASONAL DIETARY FRUIT WITH A HIGH RISK OF MICROBIOLOGICAL SPOILAGE

Hafizov G.
Research Institute of Fruit and Tea Growing of the Ministry of Agriculture of the Republic of Azerbaijan
DOI: 10.5281/zenodo.22091509

Abstract
Prunus avium L. - (sweet cherry) is the only species of wild cherry of the Plum genus (Prunus), which has become the ancestor of all cultivated varieties. However, in the wild, there are from 40 to more than 100 independent species within the subgenus Cerasus (cherry), including shrubby and woody forms. A review of the literature on the biological characteristics of sweet cherries is presented. The paradox of culture is described: The high nutritional and vitamin value of the fruits is combined with their low shelf life and vulnerability due to the delicate structure of the pulp. The article highlights the urgency of searching for effective technologies to extend the shelf life of crops.
Keywords: sweet cherry, nutritional value, post-harvest preservation.

Sweet cherries, which are woody plants belonging to the Rosaceae family, are grown in more than 50 countries around the world, with Turkey taking the first place in its production in the northern hemisphere and Chile in the southern hemisphere. Ziraat 0900, Yerli Burlat, and Starks Gold cherry varieties are widely cultivated in Turkey: 0900 Ziraat (also known as Napoleon or Turkish Cherry) is Turkey's main export variety, characterized by large fruits, dense flesh, and excellent transportability; Early Burlat (officially Bigarreau Burlat) is a popular early variety native to Morocco with juicy, dark red fruits.Stark Gold is a Ghanaian variety with yellow fruits, which is mainly used as an excellent pollinator for other cherries. About 70 varieties are grown in Chile, of which the main ones are Lapins, Van, Stella and Summit bred at the research center in Summerland in Canada.

One of the world's largest cherry producers is the USA, where about 350-380 thousand tons of sweet cherries (and about 100-140 thousand tons of sour cherries) are harvested annually. American breeding is famous for its large, dense and sweet fruits, which are popular all over the world. The following base varieties are grown in the commercial sector:

- Bing with maroon sweet heart-shaped fruits that ripen in the middle of the season; Rainier with yellow-pink fruits characterized by increased sweetness and juiciness;
- Lapins is a late self-fertile variety, bred (as mentioned above) in Canada, yielding large dark red berries;
- Chelan and Royal Tioga are popular early ripening varieties with high resistance to cracking.

Among the economic regions of Azerbaijan, 45% of cherry production is in the Guba-Khachmaz region. For many years, Azerbaijan has grown mainly the varieties Bigarro Grole, Ramon Oliva, Cassini early, Drogana yellow, Franz Joseph, Kalureyi [1]. In recent years, local farmers have preferred such imported varieties as Ziraat 0900 (which is a selective selection of Turkish native forms), Bigarreao Burlat (Early Burlat), Kordit, Regina, Summit, Lapins, obtained by directional breeding methods in Canada, the Czech Republic and Germany (fig. 1)**.** There are few old cherry plantations with tall trees left in Azerbaijan, and an almost complete transition has been made to new rootstocks, varieties, and planting patterns that radically bring the distances between trees and row spacing closer together. Here, the specialized institution for breeding and cultivating new varieties of subtropical stone and seed crops in new conditions and studying the suitability of their fruits for long-term storage and processing into certain types of canned and other products is the Research Institute of Fruit and Tea Growing, which has a network of strongholds and experimental bases in Absheron, Guba, Lenkoran, Geokchai, Zakataly [2-6].

*Figure 1. Sweet cherries of varieties 0900 Ziraat (**a**), Bigarreao Burlat (**b**), Kordit (**c**), Regina (**d**), Summit (**e**), Lapins (**f**).*

The main advantage of intensive and super-intensive technologies is the use of dwarf and semi-dwarf rootstocks, which, combined with dense planting, significantly increase yields per hectare. Dwarf rootstocks include:

- Gisela 5 is a classic dwarf rootstock of German breeding. Reduces the size of the tree to 2.5 m. It provides early and abundant fruiting, but requires fertile soils and mandatory watering.
- VSL-2 is a highly productive and hardy semi-dwarf clone rootstock of Russian breeding. It is re-

sistant to waterlogging, heavy soils and is well compatible with almost all varieties.

-Gisela 6 is a semi-dwarf rootstock. Unlike the fifth "Gisela", the tree on this rootstock turns out to be more powerful, less demanding of the soil and drought-resistant.

- LCors is a semi-dwarf clonal rootstock characterized by excellent winter hardiness and good compatibility with many varieties.

-Maxma 14 (Maxma Delbard 14) is a popular semi-dwarf clone rootstock of French breeding. The tree grows to 65-75% of the size of a wild cherry, reaching a height of about 3-4 meters, which facilitates care and harvesting, accelerates the onset of fruiting by 3-4 years and is highly resistant to diseases. The rootstock does not form a root growth, which makes it easier to care for.

Such trees begin to bear fruit in 2-3 years, and their small height dramatically simplifies care.

The transition from old tall trees to modern methods gives gardeners the following important advantages:

- The height of the trees usually does not exceed 2-3 meters. This allows you to harvest crops directly from the ground, without using dangerous ladders and heavy physical labor.

- 1000 to 3500 seedlings are planted per 1 hectare (instead of 400-500 in the old-fashioned way). Yields can reach up to 40-60 tons per hectare, while traditional gardens produce about 12 tons.

- The first commercial fruits can be obtained as early as the 2nd or 3rd year after planting.

- Low-growing gardens are often covered with special nets or film (the "anti-rain" system). This protects the fruits from cracking due to rain and hail, and also saves the crop from birds and insects.

- Thanks to the tiny crown, pruning, pest spraying and berry picking can be mechanized or carried out with maximum precision, spending less time and money on chemicals.

- Due to drip irrigation and targeted fertigation (applying fertilizers directly to the roots), berries grow large, which makes them much more competitive in export markets, where caliber and quality play the first role.

This approach transforms the cultivation of sweet cherries from a seasonal hobby into a controlled and highly profitable agribusiness.

Although it is often called a berry in everyday life, from a botanical point of view, a cherry is a juicy stone fruit or drupe. It has a reference nutritional profile for stone fruits. The low caloric content (about 52-100 kcal per 100 g of product) and the glycemic index (about 25) make cherries available for dietary nutrition. Fruits are a source of vitamins A, E and B, ascorbic acid (vitamin C), silicon and molybdenum. Dark cherry varieties are especially appreciated for their concentration of anthocyanins and other flavonoids, which reduce inflammation, strengthen capillaries and protect cells from aging. Fruits consist of (82-85%) structured water, contain pectins and dietary fiber, which improve intestinal motility. The benefits of sweet cherries are associated with their content of organic acids, simple sugars, and pectin substances. Together, they create an effect that brings cherries into a range of medicinal products. The high content of biologically active substances useful for the prevention of certain diseases, combined with bright color and excellent taste, is the reason for the growing consumer demand for the fruits of this plant.

Cherries quickly release heat and accelerate metabolism immediately after removal from the tree, which leads to rapid breakdown of sugars and loss of moisture. The high water content in the cells makes the skin easily permeable and prone to cracking at the slightest changes in humidity or mechanical stress. Unlike other fruits, cherries do not have a dense cover, which opens up access to the development of microorganisms and fungal infections (for example, gray rot). The petiole serves as a natural barrier against bacteria. Without it, the shelf life of fruits is reduced by 2-3 times. At room temperature without cooling, fruits lose their marketable appearance in just 6-8 hours, and in a household refrigerator - in 7-10 days.

Sweet cherries are valuable but capricious raw materials for processing, requiring strict technological regulations. The main difficulty lies in the fact that fruits deteriorate quickly, are prone to cracking and exposure to pests, so their processing should be carried out as quickly as possible after harvesting. For processing, the cherries are removed 3-5 days before full maturity (the fruits should be dense). Manual harvesting is preferable to preserve the integrity of the skin. For whole-fruit canning (compotes, jams), dense, large berries with a high content of sugars and acids are used. At the same time, heat treatment requires precise pasteurization modes in order to preserve the shape of the berries and the vitamin composition. For the production of candied fruits and dried fruits, fleshy varieties (often yellow cherries) are used, which keep their shape well when dehydrated and soaked in syrup. Smaller fruits and varieties with a rich dark color are used for juices, purees and jams.

The taste, color, and other marketable qualities of cherries are influenced not only by the variety, but also by the conditions of cultivation, harvesting, packaging, and transportation [7-9]. The storage efficiency of sweet cherries depends not only on the indicators of its chemical composition, applied agricultural techniques, ripeness during harvesting and storage conditions, but also on their susceptibility of different pomological varieties to various physiological and fungal diseases. The loss of fruit weight, hardness, color, and taste, as well as the appearance of fungi or other physiological diseases, limit their shelf life over long periods of time[10-12].

Fully ripened cherries are not stored for long, so the cherries for refrigeration storage are harvested at the commercial stage of maturity a few days before their full ripening (Fig. 2).

a **b**

Figure 2. "Bulls Heart" cherries are in the stages of commercial (a) and consumer (b) maturity.

The responsiveness to certain cold storage conditions of Ziraat 0900, Lapins and Bulls Heart sweet cherries grown in the Guba Khachmaz region, which were harvested at the commercial stage of maturity 5-7 days before their full ripening, was studied [13].

Ziraat 0900 and Lapins are varieties of the latest introduction, grown in Azerbaijan mainly on the medium-growing rootstock Maxsima-14 of French origin, and the Cowhide heart variety belongs to the varieties traditionally cultivated here on the strong-growing rootstock (wild).

In the Guba-Khachmaz region, sweet cherries of the Cowhide Heart variety begin to ripen from mid–June (although unevenly, so they are harvested in several periods), and sweet cherries of the Ziraat 0900 and Lapins varieties - in the last decade of June and the first decade of July, respectively.

The cherries were stored for 3 weeks in the refrigerator compartment of the gorenje refrigeration cabinet, manufactured by Gorenje BT LLC (Moscow) at a temperature from 0 to +2 ° C (humidity 90-95%).

When laying the fruits for cold storage, closed bags made of 0.05 mm thick polyethylene with a size of 25x40 cm were used; the label indicated the name of the variety, quantity, date and shelf life.

By the end of the allotted period for cold storage of sweet cherries, the yield of standard fruits was highest in the Ziraat 0900 variety, amounting to 89.9%, and the lowest in the Cowhide Heart variety (80.0%).

The Ziraat 0900 and Lapins varieties were distinguished by a lower percentage of overripe fruits by the end of storage (9.1 and 10.2% versus 18.4% for the Cowhide Heart variety). The percentage of rotten fruits, depending on the variety of sweet cherries, did not vary as much (1.0-1.6%) as the percentage of standard and overripe fruits.

During the three weeks of storage, there was a natural decrease in the range from 5.1% (Ziraat 0900) to 9.8% (Cow's Heart). In the Lapins variety, it was almost the same (5.3%) as in the Ziraat 0900 variety.

During the same time, the value of the "maturity index" has grown significantly – the ratio between the content of soluble solids and titrated acids (SS/TA). This is especially true for sweet cherries of the Cowhide Heart variety, which had a "maturity index" of 22.5 at the beginning of storage and increased to 34.7 at the end of storage. The result of "aging" at such a high rate was that in the sample of cherries of this variety, at the end of its cold storage, the natural loss was the highest (9.8%), and the percentage of overripe fruits reached 18.4 (this is on average 2 times higher than in the other two tested varieties).

Accordingly, from the point of view of the impact on the preservation of the consumer value of cherries during its three-week cold storage, the "maturity index" indicator was the most informative among the studied initial indicators; the results show that the ratio SS (soluble solids)/ TA (titrated acidity) it should not be higher than 15.

It is significant that the percentage of standard fruits by the end of the entire three-week storage period for cherries of the tested three varieties was 80.0 - 89.9 (which is not considered a high end result in refrigeration technology), and it was in the last week of storage that symptoms such as drying of the stalks, pitting and rotting increased.

This means that three weeks is too long a time to store the fruits of the tested three varieties of sweet cherries under the pre–set conditions noted above.

To extend the shelf life of sweet cherries of the Daria, Severin, Superb and Stella varieties to one month, the classic storage method was tested (at a temperature of 1-4 ° C and humidity of 85-90%) and under a controlled atmosphere (temperature 2-4 ° C, humidity 95-100%, O_2 and CO_2 concentrations of 3% and 2-5%, respectively). It has been found that both methods prolong the shelf life of the fruits of the aforementioned varieties. The influence of storage conditions on the quality of fruits was expressed in the fact that, regardless of the cherry variety, such indicators as hardness, acidity, natural loss and percentage of depreciation due to the appearance of diseases were lower in a controlled atmosphere than when stored in the cold [14].

Another study was conducted with sweet cherry varieties Kristalina - Cristalina (a Canadian precocious variety with dark red heart-shaped fruits) and Prime Giant or Prime Giant - Prime Giant (a large-fruited Italian variety of early or medium maturity), harvested at the stage of commercial maturation. The fruits were treated with salicylic acid (SA), acetylsalicylic acid (ASA) or oxalic acid (OA) at a concentration of 1 mM and then stored for 20 days at a low temperature. The results showed that all treatments slowed down the process of post-harvest fruit ripening, this was manifested in lower acidity, less color change and less loss of density, as well as in maintaining quality characteristics for a longer period than in control cherry samples. In addition, the total amount of phenols, anthocyanins, and antioxidant activity increased in untreated fruits during the first 10 days of storage, and then decreased, while in fruits of all treatment options, these parameters continuously increased during storage without significant differences between the treatment options. Thus, treatment with natural compounds such as SC, ASA, or OA slowed down maturation and enhanced the bioactive compounds and antioxidant potential of sweet cherries [15].

Several cherry varieties (new ones included Santina, Sumpaea Celeste, Sumnue Cristalina, Sumste Samba, Sandra Rose, Sumleta Sonata and Skeena, and the standards were Lapins, Sweetheart and Bing) were stored in packages in air or in a modified atmosphere

(MGS) at 1 °C for 2 and 4 weeks, respectively. The fruits were evaluated by defects (browning of the stems, wrinkling of the stems and pitting on the surface of the fruits), as well as by the quality of the fruits during harvest and after storage. The weight loss during storage was influenced by the year, storage regime, and grade. The wrinkling and browning of the pedicels and the pitted surface of the fruits varied depending on the variety and year. As a rule, fruits stored in the MAP had a higher hardness than when harvested or stored in the air [16].

Over the course of three years, the influence of the rate of setting the storage temperature and the temperature itself, as well as the composition of the atmosphere, on the preservation and shelf life of British cherries was studied. The cooling rate only affected the weight loss and the quality of the peduncle. Hydrocooling resulted in the least weight loss, possibly as a result of water absorption. The shelf life at 0 °C was longer than at 2 °C or higher, but 4 °C was sufficient for storage periods of up to 14 days. There was no consistent effect from 16 combinations of 0.5, 10, and 20% CO_2 with 1, 2, 4, and 21% O_2, and in general, such storage was not superior to air storage. It was not possible to reduce the harmful effect on the preservation of cherries at such an excessively high temperature as 10 ° C, either by changing the cooling rate or by regulating the composition of the gas medium. Rotting was the main cause of storage losses at 0 °C, 10 °C or 20 °C, and its degree increased with increasing shelf life. The storage was longer at 0 °C. The respiratory rate at 10 °C was the same for samples previously stored at 0 °C in air or in an environment containing 1% O_2, but at 20 °C the respiratory rate was higher if the fruits were previously stored in air. Fruits were more susceptible to damage at 0 °C than at 5 °C, but the rate of bruising increase with increasing impact energy was the same. It was concluded that the maximum shelf life could be obtained if fruits were cooled to 1 °C for 36 hours after harvest, and then kept at 0 °C in the air [17].

The influence of various packaging materials with a modified atmosphere on the post-harvest period and the quality of Ziraat 0900 sweet cherry fruits was studied. For this purpose, the cherries were stored for 50 days at a temperature of 0 °C and a relative humidity of 90-95% in three types of packaging. The first group of sweet cherries was packed in microperforated Xtend bags (MAP-1), the second in ordinary nonperforated plastic bags (MAP–2), and the third in ordinary perforated plastic bags (MAP-3-Control). Fruit samples were taken from different warehouses with an interval of 10 days, and physical and chemical changes were determined in the fruits. The results of the experiment showed that cherries packaged in MAP-1 had the least weight loss. Sweet cherries packaged in MAP-2 had a higher content of soluble solids. The titrated acidity in all variants increased during the first 10 days of storage, and then decreased. Fruits stored in MAP-1 had the highest hardness of the pulp, titratable acidity and taste qualities. The most effective packaging for combating the darkening of the peduncle was MAP-1. It was concluded that Ziraat 0900 sweet cherries can be stored for up to 50 days in a MAR-1 package at a temperature of 0 °C and a relative humidity of 90-95% [18].

Cherry samples were treated with cold plasma at different voltages (40, 60, 80 kV) and different processing times (60, 80, 100, 140 seconds), then stored in a refrigerator at 0 ° C in order to analyze its quality under different processing conditions and the total number of colonies at the end of storage. The results showed that the treatment of sweet cherries with cold plasma under certain conditions was effective in prolonging their shelf life, inactivating microorganisms, reducing the rate of decomposition and inhibiting respiration, either without deterioration in fruit quality or with only a slight manifestation of it. This study showed that cold plasma can be used in the storage and preservation of sweet cherries [19].

Considering that most cherries produced in the Pacific Northwest of the United States and shipped to remote markets are often stored and transported for more than 3 weeks, the effect of 27 effects of O_2 and CO_2 concentrations in modified atmosphere (MAP) packages on extending their shelf life in 4-6 weeks of cold storage was studied. It was found that in order to preserve the aroma without damaging the fruit in conditions of temperature fluctuations that may occur during commercial storage and transportation, such a regulation of gas permeability is most applicable, which is able to provide an atmosphere with a content of 5-8% O_2 inside the package [20].

In the course of a scientific experiment, the effect of ionized air on changes in commodity qualities, some biochemical parameters and physico-mechanical properties of sweet cherries during its cold storage was studied. The experiment used fruits of only the first commercial grade, which were cooled at a temperature of 0 ...+1 °C for 15 hours before being stored. Fruits of 1 kg were packed in 25x40 cm bags made of 0.05 mm thick plastic film. The treatment was carried out by injecting air ionized by a corona discharge electric current with a voltage of 5000, 10000 or 15000 V into bags with fruits, with an exposure of 5, 10, 15 minutes at each voltage value. The processed cherries were stored in sealed bags at a temperature of +1 ± 0.5 °C; the yield of the first commercial grade sweet cherries after 90 days of storage was much higher than in the control variant without treatment, and amounted to 91-97% [21].

Freshly picked cherry fruits of 8 varieties grown in the northern foothill zone of Dagestan were immersed in a liquid coolant (a mixture of water, alcohol and sugar taken in a weight ratio of 65:20:15) and frozen in it at a temperature of -24 °C and scattered in the air at temperatures of -30, -33 and -35 °C, and then stored at -22 °C for 3, 9, and 12 months; changes in quality indicators were observed in the freeze–storage–defrost cycle [22]. The results showed that by freezing fruits in bulk in an air environment at a temperature of -33 °C or immersion in a liquid coolant at a temperature of -24 °C and storage at a temperature of -22 ° C, the consumption period of cherries, depending on its variety, can be extended to 3, 9 and 12 months.

In practice, in order to ensure the preservation of the initial physico-chemical and organoleptic characteristics for a long time, the shock freezing method is used, which is carried out in four stages:

1- Cooling to 0 °C;

2- Fast passage of the crystallization range (from 0 °C to -5 °C);

3 - Instant cooling to - 18 ...- 35 °C.

4- Defrosting - gradual thawing of the product for 12 to 16 hours in a narrow temperature range from +2 °C to +4 °C.

Cooling cherries to 0 °C reduces the temperature of freshly picked fruits and stops metabolism and spoilage.

Lowering the temperature to -5 °C triggers the phase transition of water to ice (crystallization). This smooth first stage of the "shock" allows the water inside the cells to freeze properly - 70% of the product fractions crystallize, many small ice crystals are created, while the cell walls remain intact.

After passing the -5 °C mark, the temperature in the chamber is quickly lowered further (to -18...-35 °C) to complete the freezing. This protects the cherries from loss of juice and vitamins.

Instant cooling to such low temperatures prevents the growth of large ice crystals, preserving the cellular structure and elasticity of the fruit.

Defrosting is necessary to give the cherries a lively appearance from shock freezing, for which they are placed on the bottom shelf of the refrigerator. Do not defrost cherries in hot or warm water, in a water bath, in a microwave oven or at room temperature, as this destroys the delicate structure of the pulp, leads to a strong release of juice and rapid spoilage of the product.

After complete defrosting, it is recommended to sell shock-frozen cherries within 24-48 hours (if stored in the refrigerator at temperatures from +2 ° C to +6 °C), and the defrosting process is carried out gradually.

Thus, cherries are a perishable delicacy, whose species specificity is determined by a biological paradox: the rich vitamin and mineral composition and delicate structure of the pulp cause high nutritional value, but at the same time create critically low natural shelf life of fruits and make them extremely vulnerable after harvest.

The key factors for extending the availability period of sweet cherries in each season are the choice of varieties that are less susceptible to microbiological spoilage and technologies that take into account their responsiveness to different cold storage conditions for 1 month.

For long-term storage of cherries for up to 3 months or even a year without noticeable deterioration in quality, there is no alternative to shock freezing technology.

References

1. Kerimova, H.I. Evaluation of sweet cherries (Prunus Avium L.) by pomological and biochemical parameters in the Republic of Azerbaijan. The successes of modern natural science. 2020. 11: 13-19. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44324987.

2. Garagurbanlı, İ., Suleymanova, S., Hafizov, G. Rootstocks GF677, Garnem 15, Maxma 14 and Myrobalan 29C: from introduction to culture in vitro to adaptation of planting material ex vitro. AIP Conf. Proc. 2526, 040008 (2023). DOI: 10.1063/5.0116104.

3. Balazade, Ch., Hafizov, G. Propagation of Azerbaijani chestnut by tissue culture. African Research J of Biosciences. 2024. 1(1): 44-52. DOI: 10.62587/AFRJBS.1.1.2024.44-52.

4. Piriyeva, M., Hafizov, G. Post-harvest storage of apple fruits of Azerbaijani selection. The scientific heritage. 2022. 89(89): 4-6. DOI: 10.5281/zenodo.6575706.

5. Hafizov, S.G., Qurbanov, I.S. and Hafizov, G.K. Ensuring transparency of pomegranate juice during its storage. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. 640, 022055. DOİ: 10.1088/1755-1315/640/2/022055.

6. Hafizov, S., Hafizov, G. Industrially applied methods for the production of pomegranate polyphenols. Science and innovation 2021: development directions and priorities (Vol. 2), Melbourne: AUS publishers, 2021. 198 - 207. DOI: 10.34660/INF.2021.77.66.031.

7. Correia, S., Schouten, R., Silva A., Goncalves, B. Factors affecting quality and health promoting compounds during growth and postharvest life of sweet cherry (Prunus avium L.). Frontiers in Plant Science. 2017. 8, 2166: 1-15. DOİ: 10.3389/fpls.2017.02166.

8. Chiabrando, V., Garavaglia, L., Giacalone, G. The postharvest quality of fresh sweet cherries and strawberries with an active packaging system. Foods. 2019. 8, 335: 1-12. DOİ: 10.3390/foods8080335.

9. Parveen, S., Hussain, P.R., Mir, M.A., Shafi, F., Darakshan, S., Mushtaq, A., Surad-kar, P. Gamma irradiation treatment of cherry – impact on storage quality, Decay per-centage and post-refrigeration shelf-life extension. Current Nutrition & Food Science. 2015. 3(1). DOI: 10.12944/CRNFSJ. 3.1.07.

10. Dziedzic, E., Blaszczyk, J., Kaczmarczyk, E. Postharvest properties of sweet cherry fruit depending on rootstock and storage conditions. Folia Horticulturaeş. 2017. 29(2): 113-121. DOİ: 10.1515/fhort-2017-0011.

11. Sen, F., Oksar, R.F., Golkarian, M., Yaldiz, S. Quality changes of different sweet cherry cultivars at various stages of the supply chain. Not. Bot. Horti. Agrobot. 2014. 42(2): 501-506. DOI: 10.15835/nbha.42.2.9596.

12. Serrano, M., Martinez-Romero, D., Castillo, S., Guillen, F., Valero, D. The use of anti-fungal compounds improves the beneficial effect of MAP in sweet cherry storage. Inov Food Sci Emerg. 2005. 6: 115-123. DOİ: 10.1016/j.ifset.2004.09.001.

13. Hafizov, G.K., Pirieva, M.A. Cold storage of cherries without freezing: yield of standard fruits and losses. Fruit growing and viticulture of South Russia. 2022. 77(5): 243-260. (In Russ.). DOİ: 10.30679/2219-5335-2022-5-77-243-260.

14. Mădălina, B., Mihai, C. The influence of different storage methods on fruits quality of some sweet cherry cultivars. Fruit Growing Research. 2020. 26: 106-111. DOI: 10.33045/fgr.V.36.2020.13.

15. Valero, D, Diaz-Mula, H.M., Zapata, P.J., Castillo, S., Guillen, F., Martinez-Romero, D., Serrano, M. Postharvest treatments with salicylic acid, acetylsalicylic acid or oxalic acid delayed ripening and enhanced

bioactive compounds and antioxidant capacity in sweet cherry. Agri Food Chem. 2011. 59: 5483–5489. DOI: 10.1021/jf200873j.

16. Kappel, F., Peter, M.A. Toivonen, Mckenzie D.-L., Stan, S. Storage characteristics of new sweet cherry cultivars. Hort Science. 2002. 37(37): 139-143. DOI: 10.21273/HORTSCI.37.1.139.

17. Stow, J.R., Jameson, J., Senner, K. Storage of cherries: The effects of rate of cooling, store atmosphere and store temperature on storage and shelf-life. J of Hort Scitnce and Biotechnology. 2004. 79(6): 941-946. DOI: 10.1080/14620316.2004.11511870.

18. Kurubaş, M.S., Özalp, G.Ş., Erkan, M. Impact of modified atmosphere packaging on fruit quality and postharvest life of '0900 Ziraat' cherries. Derim. 2018. 35(1): 19-26. DOI: 10.16882/derim.2018.314511.

19. Wu, X., Zhao, W., Zeng, X. Effects of cold plasma treatment on cherry quality during storage. Food Sci and Technol İnt. 2021. 27: 5. DOİ:10.1177/1082013220957134.

20. Wang, Y., & Long, L. E. Respiration and quality responses of sweet cherry to different atmospheres during cold storage and shipping. Postharvest Biology and Technology. 2014. 92: 62-69. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2014.01.003.

21. Stepanenko D.S., Proskurnya T.O., Zaritskaya D.V. Dynamics of physico-mechanical properties of cherry fruits of the light-colored Dachnitsa variety during storage in an electroionized air environment. Magarach. Viticulture and vinification. 2010. 4: 18-19. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23577689.

22. Huseynova, B. M., Musayeva K.E. Study of suitability for low-temperature preservation of cherry fruits. Machinery and technology of food production. 2024. 54(1): 178-190. (In Russ.). DOI: 10.21603/2074-9414-2024-1-2499.

BIOLOGICAL SCIENCES

ПРОРАЩИВАНИЕ ЗЕРНА: ФИТОХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕСТРОЙКА И ВЛИЯНИЕ НА МЕТАБОЛИЧЕСКОЕ ЗДОРОВЬЕ

Бурак Л.Ч.
https://orcid.org/0000-0002-6613-439X
доктор философии в области пищевых наук (PhD), к.т. н,
директор ООО «БЕЛРОСАКВА», Республика Беларусь, г. Минск.
Саманкова Н.В.
https://orcid.org/0000-0003-4518-3480
Белорусский государственный экономический университет, доцент кафедры товароведения и экспертизы товаров, к.т.н. Минск, Беларусь

GRAIN GERMINATION: PHYTOCHEMICAL ALTERATIONS AND IMPACT ON METABOLIC HEALTH

Burak L.
https://orcid.org/0000-0002-6613-439X
Doctor of Philosophy in Food Sciences (PhD), c. t. s.,
director of BELROSAKVA LLC, Republic of Belarus, Minsk
Samankova N.
https://orcid.org/0000-0003-4518-3480
Belarusian State University of Economics, Associate Professor of the Department of Commodity Science and Expertise of Goods, PhD in Engineering Minsk, Belarus
DOI: 10.5281/zenodo.22091515

Аннотация

Введение. Проращивание рассматривается как эффективная биотехнологическая стратегия модификации химического состава зернового сырья без применения экстрактивных методов, что особенно востребовано в условиях растущего спроса на натуральные и безглютеновые функциональные продукты питания.

Цель исследования. Обобщение и критический анализ современных данных о влиянии проращивания на фитохимическую перестройку цельных зерен злаковых и псевдозлаковых культур, а также систематизация доказательств относительно физиологических эффектов пророщенных зерен на здоровье человека.

Материалы и методы. Материалом послужили рецензируемые публикации за 2018–2026 гг. из баз Scopus, Web of Science и PubMed по ключевым словам: germination, whole grains, cereals, pseudocereals, phytochemicals, bioavailability, metabolic health. Включены исследования in vitro, доклинические эксперименты и ограниченные клинические данные.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что активация метаболизма при проращивании приводит к значительной перестройке фитохимического профиля: накоплению GABA, фенолов, флавоноидов, каротиноидов и токоферолов, синтезу видоспецифичных метаболитов (алкилрезорцинолы, авенантрамиды, бензоксазиноиды, гордатины, 3-дезоксиантоцианы, γ-оризанолы) и снижению фитиновой кислоты. Обсуждается модулирующее влияние нетермических методов предобработки на фитохимический состав, однако подчеркивается зависимость конечных эффектов от генотипа и условий герминации, что затрудняет стандартизацию. Доклинические данные свидетельствуют о повышении биоактивности пророщенных зерен in vivo, включая модуляцию экспрессии генов липидного и углеводного обмена.

Выводы. Проращивание является действенной платформой для создания обогащенных фитонутриентами ингредиентов функционального питания. Доказанное положительное влияние на гликемический контроль, липидный профиль, воспаление и микробиом кишечника подтверждает перспективность пророщенных зерен для профилактики метаболических нарушений. Для перехода к практическим рекомендациям необходимы дальнейшие стандартизированные исследования in vivo, расширение клинической базы и разработка объективных критериев эффективности пророщенного сырья в составе реальных пищевых продуктов.

Abstract

Introduction. Germination is regarded as an effective biotechnological strategy for modifying the chemical composition of grain raw materials without the use of extractive methods, which is particularly relevant in the context of growing consumer demand for natural and gluten-free functional foods.

Objective. To synthesize and critically analyze current evidence on the effect of germination on the phytochemical remodeling of whole grains of cereals and pseudocereals, as well as to systematize the evidence regarding the physiological effects of germinated grains on human health.

Materials and Methods. The material comprised peer-reviewed publications from 2018–2026 indexed in Scopus, Web of Science, and PubMed, retrieved using the following keywords: germination, whole grains, cereals, pseudocereals, phytochemicals, bioavailability, metabolic health. In vitro studies, preclinical experiments, and limited clinical data were included.

Results and Discussion. Activation of metabolism during germination has been shown to induce significant remodeling of the phytochemical profile, including accumulation of GABA, phenols, flavonoids, carotenoids, and tocopherols, synthesis of species-specific metabolites (alkylresorcinols, avenanthramides, benzoxazinoids, hordatines, 3-deoxyanthocyanins, γ-oryzanols), and a reduction in phytic acid content. The modulating influence of non-thermal pretreatment methods on the phytochemical composition is discussed; however, the final outcomes are strongly dependent on genotype and germination conditions, which complicates standardization. Preclinical data indicate enhanced in vivo bioactivity of germinated grains, including modulation of gene expression involved in lipid and carbohydrate metabolism.

Conclusions. Germination represents a viable platform for producing phytochemical-enriched functional food ingredients. The demonstrated beneficial effects on glycemic control, lipid profiles, inflammation, and gut microbiome support the potential of germinated grains for the prevention of metabolic disorders. To translate these findings into practical recommendations, further standardized in vivo studies are required, along with expanded clinical evidence and the development of objective criteria for evaluating the efficacy of germinated grains in real food matrices.

Ключевые слова: проращивание, цельные зерна, злаки, псевдозлаки, фитохимические вещества, GABA, биодоступность, метаболическое здоровье, кишечная микробиота

Keywords: germination, whole grains, cereals, pseudocereals, phytochemicals, GABA, bioavailability, metabolic health, gut microbiota.

ВВЕДЕНИЕ

Проростки, микрозелень и молодые листья все чаще признаются ценными овощами благодаря высокой концентрации питательных веществ, разнообразию фитохимических соединений и пригодности для употребления в свежем виде. Мировое производство этих культур быстро растет: рынок проростков, оцениваемый в 1,62 миллиарда долларов в 2024 году, по прогнозам достигнет 2,70 миллиарда долларов к 2037 году (среднегодовой темп роста 4,0%). Микрозелень демонстрирует еще более сильный рост: в одном отчете прогнозируется рост до 17,04 миллиарда долларов к 2025 году [1]. Эти микроовощи могут быть выращены из широкого спектра семян (бобовых, злаков, псевдозлаков), что обеспечивает значительное разнообразие вкусовых качеств и питательного состава. Быстрый рост, небольшая занимаемая площадь и низкие ресурсозатраты делают их хорошо подходящими для сельского хозяйства в контролируемой среде. В этом более широком контексте зерновые и псевдозлаковые культуры представляют собой особенно недоиспользуемый ресурс, несмотря на растущие доказательства того, что проращивание существенно повышает их питательную ценность [2]. Растущий интерес к пророщенным зернам отражает растущий спрос на минимально обработанные, функциональные продукты с «чистой этикеткой» [3]. Прорастание знаменует переход от спящего семени к активно растущему саженцу, активируя гидролитические и метаболические пути, которые могут повысить доступность питательных веществ, антиоксидантную способность и накопление биоактивных фитохимических веществ [4]. Однако эти изменения в составе не следует интерпретировать как прямое доказательство улучшения питательной или физиологической эффективности. Например, прорастание может снизить содержание антипитательных факторов, таких как фитиновая кислота и дубильные вещества, но биодоступность железа и цинка определяется остаточным соотношением фитата и минералов, потерями минералов во время замачивания, структурой зерновой матрицы и последующей обработкой [5, 6]. Хотя проращивание зерновых имеет глубокие исторические корни, его целенаправленная интеграция в переработку цельного зерна лишь недавно стала важной областью инноваций [4, 7]. Американская ассоциация химиков зерновых культур определяет проросшие зерна как солодовые или пророщенные зерна, сохраняющие структуру отрубей-зародыша-эндосперма, при этом удлинение ростка не превышает длину зерна [8]. Однако такая стандартизация по своей сути является сложной задачей, поскольку реакция прорастания сильно зависит от вида зерна, сорта, структуры семени и условий окружающей среды [9]. Хотя в ряде обзоров рассматривались конкретные аспекты пророщенных зерен [10,11,12, 13,14,15], их охват остается фрагментарным, особенно в отношении того, как прорастание изменяет специфические биоактивные фитохимические вещества и как эти изменения влияют на здоровье. В частности, существующие обзоры не содержат углубленного анализа того, как прорастание изменяет как общие фитохимические вещества (ГАМК, каротиноиды, флавоноиды, фенолы, поликозанолы, токоферолы и фитостеролы), так и специфические для зерна биологически активные вещества (алкилрезорцинолы, авенантрамиды, авенакозиды, бензоксазиноиды, 3-дезоксиантоцианины, гордатины, γ-оризанолы) в основных злаковых и псевдозлаковых культурах, включая пшеницу, рожь, ячмень, овес, кукурузу, сорго, просо, амарант, гречиху и киноа. Новизна данного обзора заключается в трех достижениях по сравнению с существующей литературой. Во-первых, мы предлагаем систематическое, параллельное сравнение непроросших и пророщенных зерен, уделяя особое внимания фитохимическим веществам, которым в предыдущих

обзорах уделялось ограниченное внимание. Во-вторых, мы интегрируем данные, связывающие изменения фитохимических веществ, вызванные проращиванием, с результатами, имеющими значение для здоровья, подчеркивая новые механистические роли кишечной микробиоты как медиатора этих эффектов. В-третьих, мы оцениваем недавние технологические инновации, включая целенаправленную предварительную и последующую обработку, которые создают новые возможности для масштабируемого промышленного внедрения.

Цель исследования – обобщение и критический анализ современных данных о влиянии проращивания на фитохимическую перестройку цельных зерен злаковых и псевдозлаковых культур, а также систематизация доказательств относительно физиологических эффектов пророщенных зерен на здоровье человека.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие исследовательские вопросы:

1. Каковы ключевые физиологические, ферментативные и молекулярные механизмы, лежащие в основе усиления биоактивности в процессе прорастания?

2. Как проращивание влияет на содержание общих (GABA, фенольные кислоты, флавоноиды, каротиноиды, токоферолы, поликозанолы, фитостеролы) и видоспецифичных (алкилрезорцинолы, авенантрамиды, бензоксазиноиды, гордатины, γ-оризанолы, 3-дезоксиантоцианины) фитохимических соединений в различных зерновых культурах?

3. Какие доклинические и клинические данные подтверждают пользу пророщенных зерен для регуляции метаболизма глюкозы и липидов, модуляции окислительного стресса и воспаления, а также нейропротекции?

4. Какую роль играет кишечная микробиота в опосредовании системных физиологических эффектов пророщенных зерен?

5. Каковы современные технологические подходы к интеграции проращивания с предварительной (нетермические обработки) и последующей (ферментация, сушка, термическая обработка) обработкой для повышения функциональной ценности конечного продукта?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материала для исследования послужили рецензируемые научные публикации за период с 2018 по 2026 год, индексированные в международных базах данных Scopus, Web of Science и PubMed. Поиск осуществлялся по ключевым словам, включающим термины «проращивание» (germination), «цельные зерна» (whole grains), «злаки и псевдозлаки» (cereals and pseudocereals), «фитохимические соединения» (phytochemicals), «биодоступность» (bioavailability) и «метаболическое здоровье» (metabolic health). В обзор включены как фундаментальные исследования in vitro, так и данные доклинических экспериментов на животных и результаты рандомизированных клинических испытаний на добровольцах. Особое внимание уделено сравнительному анализу нативных и пророщенных образцов зерна. Всего проанализировано более 150 публикаций, из которых для детального рассмотрения отобраны 60 ключевых работ, наиболее полно отражающих фитохимические изменения и физиологические эффекты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Основные механизмы, лежащие в основе усиления биоактивности в процессе прорастания

1.1 Физиологический и биохимический обзор прорастания

Прорастание — это сложный физиологический переход, знаменующий собой превращение спящего семени в метаболически активный сеянец. Он начинается с поглощения воды (набухания) и завершается появлением корешка [16]. Физиологически прорастание проходит три взаимосвязанные фазы. Фаза I (набухание) включает быстрое поглощение воды, что приводит к набуханию зерна и регидратации макромолекул и органелл. Эта гидратация восстанавливает целостность мембран, активизирует митохондриальное дыхание и возобновляет синтез АТФ [17]. Фаза II (фаза задержки или активации) — это период метаболической реорганизации, в течение которого происходит транскрипционная и трансляционная активация генов гидролитических ферментов. Фаза III знаменует видимое прорастание, когда корешок выступает через семенную оболочку [18]. Эта перестройка развития регулируется динамическим гормональным балансом, главным образом между гиббереллинами (ГА) и абсцизовой кислотой (АБК). В покоящихся зернах высокий уровень АБК поддерживает устойчивость к засухе и подавляет метаболизм; после набухания деградация АБК и биосинтез ГА смещают этот баланс в сторону активации роста. ГА диффундирует в алейроновый слой, чтобы секретировать гидролитические ферменты, которые расщепляют запасные полимеры в эндосперме [19]. Алейроновый слой и щиток функционируют синергически как пищеварительные и абсорбционные ткани [20]. Одновременно с этим возобновление дыхания увеличивает выработку активных форм кислорода (АФК), которые выполняют двойную роль: как сигналы стресса и регуляторы роста. Контролируемая генерация и нейтрализация АФК с помощью ферментативных и неферментативных систем поддерживают окислительно-восстановительный гомеостаз [21, 22].

1.2 Ключевые ферментативные и метаболические пути, активируемые во время прорастания

Прорастание запускает строго скоординированную метаболическую перестройку, характеризующуюся активацией как гидролитических, так и биосинтетических путей. Этот процесс включает мобилизацию запасенных макроэлементов путем индукции амилолитических, протеолитических и липолитических ферментов [10–15]. Параллельно происходит масштабная реструктуризация матрикса клеточной стенки. Регулируемые гиббереллином ферменты, такие как β-глюканазы, ксиланазы и целлюлазы, деполимеризуют β-глюканы и

арабиноксиланы, увеличивая пористость стенки и облегчая высвобождение связанных фенольных соединений [23]. Вспомогательные ферменты, включая феруloилэстеразы, расщепляют сложноэфирные связи между гидроксикоричными кислотами и полисахаридами клеточной стенки, высвобождая феруловую и п-кумаровую кислоты [24]. Прорастание дополнительно активирует вторичные метаболические пути, включая шикимат-фенилпропаноидный и терпеноидный биосинтетические пути. Фенилаланин превращается с помощью PAL, C4H и 4CL в п-кумароил-КоА, центральный промежуточный продукт в биосинтезе фенольных кислот, флавоноидов, лигнанов и феноламидов [25]. Гликозил-, ацил- и метилтрансферазы дополнительно диверсифицируют эти метаболиты, повышая их растворимость, стабильность и биологическую активность [26]. Параллельно активируется биосинтез терпеноидов через цитозольный мевалонатный и пластидный метилэритритолфосфатный пути [27].

1.3 Экспрессия генов и метаболическое перепрограммирование (омиксные данные)

Транскриптомные, протеомные и метаболомные исследования прояснили многие изменения, связанные с прорастанием. Транскриптомный анализ показывает быструю активацию генов, участвующих в росте, гормональной сигнализации и стрессовых реакциях [28]. Пространственная транскриптомика прорастающего ячменя выявляет тканеспецифические генные сети в зародыше, щитке и алейроновом слое [29]. Протеомные и метаболомные исследования демонстрируют раннюю трансляцию запасных мРНК и накопление растворимых сахаров, аминокислот и флавоноидных промежуточных продуктов [30, 31]. В сорго интегрированный анализ транскриптома, GWAS и метаболома связал сигнализацию АБК с мобилизацией углеводов во время прорастания [32]. В рисе GWAS в сочетании с сетями совместной экспрессии транскриптома и метаболома позволил идентифицировать гены-кандидаты, связанные с анаэробным прорастанием, включая метаболические реакции, связанные с ГАМК [33]. В киноа транскриптомный и метаболический анализ показал, что накопление ГАМК связано со скоординированной регуляцией глутаматдекарбоксилазы и ГАМК-трансаминазы [34, 35].

2. Влияние прорастания на фитохимический состав

Проращивание существенно изменяет питательный и фитохимический состав злаковых и псевдозлаковых культур. Несмотря на видоспецифические различия, эти изменения часто улучшают отдельные питательные и функциональные свойства [11–15]. Зерновые содержат общий набор фитохимических веществ (фенольные кислоты, лигнаны, флавоноиды, поликозанолы, фитостеролы, токоферолы, каротиноиды и ГАМК), профиль которых значительно изменяется в процессе прорастания. *Фенольные кислоты.* В течение 96-часового проращивания пшеницы содержание основных фенольных кислот как в свободной, так и в связанной формах постепенно увеличивалось: 4-гидроксибензойной кислоты (~12-кратно), ванилиновой (~14-кратно), галловой (~3-кратно), п-кумаровой (~2,5-кратно), кофейной (~19-кратно) и феруловой (~1,5-кратно) [36]. У голозерного овса проращивание привело к снижению связанных фенольных соединений и увеличению свободных и общих фенольных соединений. Содержание галловой и кофейной кислот значительно увеличилось к 24 часам, в то время как содержание п-кумаровой кислоты (23,8 → 42,2 мкг/г сухой массы) и феруловой кислоты (187,5 → 313,0 мкг/г сухой массы) увеличивалось с течением времени [37]. У проса наблюдались видоспецифические тенденции: содержание свободных фенольных кислот достигло пика через 24–48 часов [38]. У сорго проращивание при 25°C приводило к большему накоплению свободных п-кумаровой, кофейной и феруловой кислот, чем при 30°C [9].

Лигнаны. Проращивание может модулировать накопление лигнанов. У тритикале содержание лигнанов увеличилось после 72 часов проращивания [39]. Проращивание ржи увеличило общее содержание лигнанов примерно на 70% [40]. *Флавоноиды*. Проращивание обычно повышает концентрацию флавоноидов. У овса проращивание вызывало появление de novo витексин-2-О-рамнозида и изовитексин-2-О-арабинозида через 3 дня, достигая 966,85 и 3293,24 мкг/г соответственно [41]. У кукурузы метаболомный анализ выявил 95 флавоноидов среди 374 обнаруженных метаболитов [42]. У пшеницы и ячменя воздействие синего светодиодного света последовательно увеличивало накопление сапонарина в ячмене на 51,7–57,7% [43].

2.1 Нефенольные соединения

Поликозанолы. У овса общее содержание поликозанолов достигло пика через 11 дней (541,7 мг/100 г) [44]. У ячменя и пшеницы уровень поликозанолов увеличивался с увеличением продолжительности роста [43]. *Фитостеролы.*. У сорго проращивание снижало уровень стигмастерола (8,41 → 5,75 мг/100 г), но увеличивало содержание β-ситостерола (30,6 → 42,6 мг/100 г) [45]. Проращивание ржи увеличило общее содержание фитостеролов с 88 до 114 мкг/100 г [40]. У пшеницы отмечены сортовые различия в реакции стерилферулатов на проращивание [46]. *Каротиноиды*. У пшеницы проращивание увеличивало общий уровень каротиноидов: у хлебной пшеницы с 1,17 до 6,66 мкг/г, у полбы с 1,19 до 9,63 мкг/г, при этом лютеин оставался преобладающим каротиноидом [46]. У проса суммарное содержание лютеина и зеаксантина увеличилось с 4,08 до 6,65 мкг/г и с 1,62 до 4,85 мкг/г соответственно [38]. *ГАМК.* У риса накопление ГАМК демонстрировало температурно-зависимую закономерность: проращивание при 35°C в течение 20 часов приводило к наибольшему содержанию ГАМК в непигментированном сорте (62,3 мг/кг) [47]. У ячменя содержание ГАМК увеличивалось во время набухания, достигая ~41–57 мг/100 г [48]. У сорго накопление ГАМК при 25°C составило ~90–120 мг/100 г [9]. У щетинника проращивание увеличило содержание ГАМК на 29% (7,15 → 38,5 мг/100 г) [49]. У киноа транскриптомный анализ

выявил CqGAD8 и CqGABA-T2 как основные факторы накопления ГАМК [35]. *Токоферолы*. У пигментированного риса в оптимальных условиях (35°C, 20 ч) наиболее распространенными гомологами витамина Е были γ-Т3 (23,4 мг/кг), γ-ТОС (12,6 мг/кг) и α-ТОС (5,47 мг/кг) [47]. У пшеницы проращивание снижало общий уровень токохроманола [46]. У четырех сортов бурого риса проращивание значительно увеличило общее содержание витамина Е во всех сортах, при этом содержание α-ТОС и α-Т3 достигло уровней в 2,41 и 2,39 раза выше соответственно [50].

2.2 Влияние прорастания на соединения, специфичные для зерна

Зерновые культуры содержат характерные метаболиты, которые определяют специфические для каждого зерна питательные и функциональные свойства. Алкилрезорцинолы (АР). У пшеницы проращивание вызывало межиндивидуальные различия: общее содержание АР увеличилось у хлебной пшеницы (661 → 751 мкг/г), полбы (731 → 893 мкг/г), твердой пшеницы (714 → 781 мкг/г) и однозерновой пшеницы (799 → 812 мкг/г), но уменьшилось у эммера (938 → 821 мкг/г) [46]. У ржи проращивание снизило общее содержание АР с 1020 до 940 мкг/100 г [40].

Бензоксазиноиды (BXD). У ржи проращивание вызвало прогрессивное накопление BXD в сеянцах. DIBOA и DIBOA-glu достигали пика через 24 ч, тогда как HMBOA-glu — через 72 ч [51]. У пшеницы 72-часовое проращивание увеличило содержание DIBOA-hex-hex (1,39 → 10,28 и 3,97 → 14,63 мг/100 г) [52]. У полбы проращивание увеличило содержание BOA, MBOA и HBOA до 20,49, 277,61 и 219,65 мкг/г соответственно [53].

Авенантрамиды (AVA). Проращивание постоянно повышает уровень AVA. У голозерного овса содержание AVA-2p, 2f и 2c увеличилось с 35,9 → 64,4, 26,7 → 50,6 и 58,9 → 64,7 мкг/г соответственно [37]. Более длительное проращивание (5 дней) привело к накоплению AVA-2c, 2p, 2f, 2cd, 2pd и 2fd в 10,0, 6,3, 9,6, 20,7, 10,6 и 4,6 раза соответственно [54]. У овса сорта Zaohau через 5 дней уровни AVA-2p, 2f и 2c достигли максимума (в 16,6, 32,8 и 15,1 раза выше) [55].

Авенакозиды (AVE). Общее содержание стероидных сапонинов удвоилось после 7 дней проращивания, достигнув 3265,54 мкг/г [56]. Пять дней проращивания привели к заметному снижению AVE-A и AVE-B (в 3,7 и 3,6 раза) и увеличению изо-AVE-A (в 3,3 раза), AVE-C (в 1,8 раза), AVE-E (в 3,3 раза) и AVE-F (в 5,0 раз) [54].

Гордатины. Проращивание в темноте вызвало увеличение содержания агликонов гордатина А и В в 51,6 и 21,4 раза соответственно. Параллельно увеличилось содержание гликозилированных гордатинов А и В, тогда как содержание глюкозида гордатина С уменьшилось [57].

γ-Оризанолы (γ-OZ). У пигментированного риса проращивание при 35°C и 40°C значительно усилило накопление γ-OZ, достигая 670 и 704 мг/кг соответственно [47]. Однако в других исследованиях отмечено незначительное снижение содержания γ-OZ (64,16 → 63,61 мг/100 г) [58].

Трицин. В условиях солевого стресса рис накапливал трицин до 107,63 мкг/г [59]. Однако 24-часовое проращивание снизило уровень трицина [60].

3-Дезоксиантоцианины (3-ДА). Проращивание сорго увеличило общее содержание 3-ДА до 20,18 мкг/г. Содержание лютеолинидина и 7-метоксиапигенинидина постепенно увеличивалось до 7,64 и 5,25 мкг/г соответственно, в то время как содержание апигенинидина снижалось (6,51 → 1,29 мкг/г) [61].

2.3 Биологические функции и механизмы фитохимических веществ

Наиболее убедительные механистические данные имеются в отношении овсяных AVA. AVA-C подавлял дегрануляцию тучных клеток, высвобождение гистамина и продукцию провоспалительных цитокинов путем ингибирования сигнализации Lyn/Syk/Akt/NF-κB [62]. Обогащенные AVA экстракты пророщенного овса улучшили функцию эпителиального барьера в клетках Caco-2 за счет увеличения трансэпителиального сопротивления и снижения уровня TNF-α, IL-6 и CXCL8 [63].В случае бурого риса экстракт пророщенного риса, содержащий γ-OZ, ГАМК, флавоноиды и антоцианидин, модулировал AMPK, рецептор инсулина-β и GLUT-4, наряду с улучшением показателей окислительного стресса и воспаления [64].Для большинства других фитохимических веществ, включая AR, BXD, AVE, гордатины и 3-DA, данные об уровне метаболических путей в клеточных или животных моделях пророщенного зерна остаются скудными.

3. Полезные для здоровья эффекты пророщенных цельнозерновых продуктов

3.1 Метаболическое здоровье: регуляция гликемии и липидов

В двойном слепом рандомизированном перекрестном исследовании (n=12) здоровые участники употребляли хлеб из смеси пророщенной и непророщенной пшеничной муки. Показатели постпрандиальной глюкозы существенно не различались между видами хлеба, что свидетельствует об отсутствии заметного острого гликемического преимущества при 50% замещении [65]. Однако в 3-месячном исследовании у лиц с диабетом 2 типа (n=68) ежедневное потребление пророщенного черного риса снижало уровень общего холестерина и глюкозы натощак. Пророщенный бурый рис продемонстрировал более значительное снижение холестерина ЛПНП и повышение активности адипонектина и LCAT [66]. В 12-недельном рандомизированном исследовании (n=112) замена рафинированного риса на пророщенный улучшила уровень глюкозы натощак (частота ответа ~62%) и снизила уровень HbA1c. Механистически пророщенный рис увеличил уровень GLP-1 и PYY и снизил уровни IL-6, IL-8, LPS и соотношение Th17/Treg [67].У взрослых с гиперлипидемией (n=56) 12-недельное применение автоклавирован-

ного пророщенного риса снижало уровень триглицеридов, общего холестерина, холестерина ЛПНП и аполипопротеина В, одновременно повышая уровень ЛПВП и АпоА1 [68]. Доклинические исследования подтверждают эти данные. В модели НАЖБП экстракт пророщенного риса более эффективно снижал уровень глюкозы натощак (252,8 против 268,8 мг/дл), триглицеридов (80 против 96,0 мг/дл) и маркеров повреждения печени, чем изолированный γ-OZ [69]. У мышей на высокожировой диете добавление пророщенного амаранта привело к снижению массы тела, уровня глюкозы натощак, общего холестерина и холестерина ЛПНП [70].

3.2 Пророщенные зерна как модуляторы окислительного стресса и воспаления

В исследованиях на основе риса пророщенный бурый рис продемонстрировал более выраженные противовоспалительные свойства, чем непророщенный. У мышей C57BL/6J замена белого риса на пророщенный снизила уровень TNF-α, PAI-1 и MCP-1 [71]. В модели крыс с диабетом 2 типа проращивание увеличило содержание ГАМК и общих фенольных соединений, что привело к усилению антиоксидантной активности (нейтрализация ABTS•+ и DPPH•) [72].В модели колита, вызванного DSS, пророщенный овес улучшил клиническую тяжесть заболевания, восстановил длину толстой кишки и снизил уровень IL-6, IL-1β, TNF-α, TGF-β и COX-2 [54]. Пророщенная татарская гречиха показала значительное увеличение содержания рутина, кверцетина, общих флавоноидов и ГАМК. У мышей C57BL/6J введение порошка пророщенной гречихи снижало уровень общего холестерина (13%) и холестерина ЛПНП (26,3%) и подавляло воспалительные медиаторы IL-6, IL-10 и IgE [73]. У спонтанно гипертензивных крыс пророщенная гречиха повышала уровни брадикинина и NO и снижала уровень МДА [74]. Пророщенная черная киноа в модели гепатотоксичности у крыс снижала активацию NF-κB/NLRP3 инфламмасомы и экспрессию TNF-α, IL-6, IL-1β и IL-18 [75]. Проращивание гречихи обыкновенной привело к увеличению содержания C-гликозилированных флавонов с 87,8 до 6707 мкг/г через 72 часа [76].

3.3 Нейропротекторные эффекты

В модели церебральной ишемии-реперфузии пророщенный пигментированный рис обеспечивал более сильную нейрозащиту, чем непророщенный. Количественный анализ выявил 11,5-кратное повышение уровня ГАМК, что указывает на нейрозащиту, усиленную проращиванием [77]. В нейронах SH-SY5Y экстракт пророщенного риса превзошел непророщенный, значительно ослабляя окислительную цитотоксичность и апоптоз [78]. Аналогичные результаты получены в клетках SK-N-SH, где экстракт пророщенного риса увеличивал выживаемость клеток (29,3% против 13,4%) [79].

3.4 Модуляция кишечной микробиоты

У взрослых с гиперлипидемией (n=56) прием пророщенного риса снизил соотношение Firmicutes/Bacteroidota и увеличил численность Bacteroides, Faecalibacterium, Dialister, Prevotella и Bifidobacterium, одновременно снижая численность Escherichia/Shigella и Blautia [68]. У пациентов с диабетом 2 типа пророщенный рис способствовал формированию сообщества с преобладанием Bacteroides и увеличению содержания ацетата, пропионата и бутирата [67]. У мышей C57BL/6J кормление пророщенным рисом увеличило общее микробное разнообразие, снизило соотношение Firmicutes/Bacteroidetes и улучшило целостность кишечного барьера [80]. У мышей пророщенная татарская гречиха обогатила Lachnospiraceae — ключевых продуцентов короткоцепочечных жирных кислот [73].

4. Интеграция процесса проращивания с технологиями предварительной и последующей обработки

4.1 Стратегии предварительной обработки

Новые нетермические технологии предобработки улучшают показатели прорастания и усиливают биосинтез вторичных метаболитов. У пшеницы низкочастотный ультразвук повысил содержание ГАМК и флавоноидов [81]. У риса высокочастотный ультразвук усилил накопление ГАМК и свободных аминокислот [82]. Холодная плазма у риса ускорила пиковое накопление фенолов и γ-OZ примерно на 1 день [83]. У ячменя холодная плазма увеличила содержание ГАМК, сапонарина, поликозанолов и растворимых сахаров [84]. Ультразвук у ячменя повысил содержание флавоноидов (кемпферол, диосмин, лютеолин) и фенольных кислот [85].У овса ультразвук повысил содержание ГАМК и аланина, но снизил содержание AVA [86]. Холодная плазма у овса повысила содержание ГАМК (53%), поликозанолов и AVE-A/B [87,88]. У кукурузы ультразвук увеличил содержание каротиноидов (зеаксантин удвоился) при снижении токотриенолов [89]. У сорго ультразвук и микроволновая обработка изменяли содержание ГАМК и фенольных соединений [90,91,]. У киноа ультразвук повысил содержание рутина и общих фенолов [92]. У гречихи ультразвук снизил содержание рутина, катехина и эпикатехина [93].

4.2 Ферментация как метод повышения ценности продукта

Последовательное проращивание с ферментацией кукурузы с использованием Bifidobacterium longum удвоило содержание белка и витамина E, утроило общее содержание фенольных соединений, увеличило содержание витамина B1 в 4 раза и ГАМК в 5 раз [93]. Ферментация пророщенной ржи с Saccharomyces cerevisiae увеличила содержание фолатов (в 7,7 раза), фитостеролов (в 2,2 раза), лигнанов (в 2,9 раза) и BXD (в 10,2 раза) [40]. Ферментация пророщенной полбы с *Lactobacillus plantarum* увеличила содержание связанной цисферуловой кислоты до 466% [94]. Интегрированный процесс с использованием консорциума Lactobacillus–Bifidobacterium произвел обогащенные ГАМК напитки из пророщенного риса (12,2 мг/100 г) [95].

4.3 Послепроращивательная обработка и стабильность фитохимических веществ

Метод сушки существенно влияет на сохранность фитохимических веществ. В пророщенном

ячмене сушка при переменной температуре (50→70°C) позволила сохранить более высокое общее содержание флавоноидов (142,7 мг/100 г), чем сушка при постоянной высокой температуре (>75 мг/100 г) [96]. Инфракрасная сушка лучше сохранила фенольные соединения, чем сушка горячим воздухом [97]. Содержание АР в пророщенной пшенице оказалось сравнительно стабильным при сушке до 90°C, хотя содержание каротиноидов и токохроманолов снизилось [46]. Приготовление пророщенного риса при 105–135°C ускоряло потерю ГАМК, однако антиоксидантная способность увеличивалась [98]. Ферментация может существенно изменять специфические биоактивные вещества. В рисовых отрубях ферментация Bacillus natto снизила содержание ГАМК с 7,21 до 0,73 мг/100 г и γ-OZ с 50,97 до 24,66 мг/100 г [99]. Влияние проращивания на содержание общих фитохимических веществ в зерновых культурах представлено в таблице1. Влияние проращивания на специфические для зерна фитохимические вещества показано в таблице 2. Краткий анализ клинических исследований метаболических эффектов пророщенных зерен показан в таблице 3, а некоторые результаты доклинических исследований противовоспалительных и нейропротекторных эффектов показаны в таблице 4. Влияние нетермических предобработок на фитохимический состав пророщенных зерен кратко показан в таблице 5.

Таблица 1.

Влияние проращивания на содержание общих фитохимических веществ в зерновых культурах

Фитохимическое вещество	Культура	Изменение	Условия проращивания	Источник
Феруловая кислота	Пшеница	+50% (187,5→313,0 мкг/г)	96 ч, 25°C	[37]
п-Кумаровая кислота	Овес	+77% (23,8→42,2 мкг/г)	48 ч, 16°C	[37]
Галловая кислота	Пшеница	+200%	96 ч, 25°C	[36]
Лигнаны	Рожь	+70%	5 дней, 18°C	[40]
Флавоноиды	Овес	Появление *de novo*	9 дней, 23°C	[41]
Сапонарин	Ячмень	+52–58%	3–9 дней, синий LED	[43]
Поликозанолы	Овес	Пик 541,7 мг/100 г	11 дней, 20°C	[44]
Фитостеролы	Рожь	+30% (88→114 мкг/100 г)	5 дней, 18°C	[40]
Каротиноиды	Пшеница	+469% (1,17→6,66 мкг/г)	5 дней, 18°C	[46]
ГАМК	Рис	62,3 мг/кг	20 ч, 35°C	[47]
ГАМК	Сорго	90–120 мг/100 г	3 дня, 25°C	[9]
γ-T3	Рис	23,4 мг/кг	20 ч, 35°C	[47]

Таблица 2.

Влияние проращивания на специфические для зерна фитохимические вещества

Соединение	Культура	Изменение	Условия	Источник
Алкилрезорцинолы	Пшеница	+14–22%	5 дней, 18°C	[46]
Алкилрезорцинолы	Рожь	-8% (1020→940 мкг/100 г)	5 дней, 18°C	[40]
DIBOA-hex-hex	Пшеница	+268–740%	72 ч, 25/15°C	[52]
AVA-2c	Овес	+900%	5 дней, 20°C	[54]
AVA-2cd	Овес	+1970%	5 дней, 20°C	[54]
AVE (общие)	Овес	+100% (3265 мкг/г)	7 дней, 20°C	[56]
Гордатин A (агликон)	Ячмень	+5060%	9 дней, темнота	[57]
Гордатин B (агликон)	Ячмень	+2040%	9 дней, темнота	[57]
γ-Оризанол	Рис	+44% (489→704 мг/кг)	20 ч, 40°C	[47]
3-Дезоксиантоцианины	Сорго	20,18 мкг/г	72 ч, 27°C	[61]

Таблица 3.

Клинические исследования метаболических эффектов пророщенных зерен

Культура	Дизайн (n)	Ключевые эффекты	Механизмы	Источник
Пророщенная пшеница	Перекрестное (12)	Нет острого гликемического эффекта	—	[65]
Пророщенный черный рис	РКИ (68)	Глюкоза натощак↓, TC↓, LDL-C↓	Адипонектин↑, LCAT↑	[66]
Пророщенный бурый рис	РКИ (112)	Глюкоза натощак↓, HbA1c↓	GLP-1↑, PYY↑, IL-6↓	[67]
Автоклавированный пророщенный рис	РКИ (56)	TG↓, TC↓, LDL-C↓, ApoB↓	HDL-C↑, ApoA1↑	[68]

Таблица 4.

Доклинические исследования противовоспалительных и нейропротекторных эффектов

Культура	Модель	Ключевые эффекты	Механизмы	Источник
Пророщенный бурый рис	Мыши HFD	TNF-α↓, PAI-1↓, MCP-1↓	Чувствительность к инсулину↑	[71]
Пророщенный овес	DSS-колит у мышей	DAI↓, длина толстой кишки↑	IL-6↓, IL-1β↓, TNF-α↓	[54]
Пророщенная татарская гречиха	Мыши C57BL/6J	TC↓13%, LDL-C↓26,3%	IL-6↓, IL-10↓, IgE↓	[73]
Пророщенная черная киноа	Крысы, тепловой стресс	AST↓, ALT↓	NF-κB↓, NLRP3↓	[75]
Пророщенный рисберри	Мыши, ишемия-реперфузия	Память↑, обучение↑	MDA↓, ГАМК↑ в 11,5 раз	[77]

Таблица 5.

Влияние нетермических предобработок на фитохимический состав пророщенных зерен

Культура	Предобработка	Фитохимические изменения	Источник
Пшеница	Ультразвук (3 мин)	ГАМК↑, флавоноиды↑	[81]
Рис	Ультразвук (5–30 мин)	ГАМК↑, свободные аминокислоты↑	[82]
Рис	Холодная плазма	Фенолы↑, γ-OZ↑ (пик на 1 день раньше)	[83]
Ячмень	Холодная плазма	ГАМК↑, сапонарин↑, поликозанолы↑	[84]
Ячмень	Ультразвук	Флавоноиды↑, фенольные кислоты↑	[85]
Овес	Ультразвук	ГАМК↑, аланин↑; AVA↓	[86]
Овес	Холодная плазма	ГАМК↑53%, поликозанолы↑, AVE↑	[87]
Кукуруза	Ультразвук	Каротиноиды↑ (зеаксантин ×2)	[88]
Сорго	Ультразвук/микроволны	ГАМК↑, фенолы↑	[89]

В совокупности результаты исследований показывают, что проращивание, управляемое предварительной обработкой, действует как регулируемое метаболическое вмешательство, позволяющее целенаправленно перепрограммировать фитохимические вещества, что приводит к противовоспалительным и метаболическим преимуществам в клеточных и животных моделях. Сочетание обогащения фитохимическими веществами с улучшенной биодоступностью и последующими физиологическими реакциями подчеркивает, что проращивание является биопроцессом, зависящим от условий, а не единой обработкой, и его значимость для здоровья определяется как исходными физическими факторами, так и последующими стратегиями обработки [100-102]

Ограничения данного обзора

Настоящий обзор имеет ряд ограничений, которые следует учитывать при интерпретации представленных данных. Во-первых, гетерогенность протоколов проращивания (продолжительность, температура, освещение, влажность) и различия в сортах и генотипах зерна затрудняют прямое количественное сравнение фитохимического профиля между исследованиями. Во-вторых, большинство доклинических исследований выполнено на ограниченном числе животных моделей (преимущественно мыши и крысы), что не всегда экстраполируется на физиологию человека из-за различий в метаболизме и микробиоме. В-третьих, клинические испытания с прямым сравнением «пророщенное vs. непророщенное зерно» немногочисленны, часто ограничены по размеру выборки (обычно n<100) и продолжительности (менее 6 месяцев). В-четвертых, данные о биодоступности и метаболизме специфических для зерна фитохимических веществ (авенантрамиды, гордатины, бензоксазиноиды) у человека остаются фрагментарными, что не позволяет установить четкие дозозависимые эффекты. В-пятых, обзор сосредоточен на злаковых и псевдозлаковых культурах, поэтому результаты могут не распространяться на бобовые или масличные культуры. Наконец, большинство исследований оценивают изолированные экстракты или обогащенные фракции, а не полноценные пищевые продукты, что ограничивает практическую применимость результатов для пищевой промышленности.

ВЫВОДЫ

Проращивание представляет собой эффективную и многогранную стратегию повышения питательной и функциональной ценности злаков и псевдозлаков. Активируя эндогенные ферментативные пути, проращивание улучшает усвояемость белка и крахмала, повышает биодоступность витаминов и минералов, обогащает широкий спектр биологически активных соединений (фенолы, флавоноиды, лигнаны, поликозанолы, фитостеролы, ГАМК, антоцианы) и снижает содержание антипитательных факторов. В сочетании с целенаправленными технологиями предварительной обработки (ультразвук, холодная плазма) и последующей ферментацией пророщенные зерна становятся функциональными пищевыми ингредиентами нового поколения. Доказанное положительное влияние пророщенных зерен на гликемический контроль, липидный профиль, маркеры воспаления, окислительный стресс и состав кишечной микробиоты подтверждает их

перспективность для профилактики метаболических нарушений и хронических заболеваний. Однако современная исследовательская деятельность по-прежнему непропорционально сосредоточена на ГАМК и общих изменениях макронутриентов, в то время как всестороннее сравнительное профилирование фитохимических характеристик и микронутриентов, специфичных для каждого зерна, остается ограниченным. Для перехода к практическим рекомендациям и масштабируемым технологиям необходимы: (1) стандартизация протоколов проращивания с учетом видоспецифических особенностей; (2) расширение клинической базы с включением прямых сравнений «пророщенное vs. непророщенное зерно» с использованием валидированных диетических биомаркеров; (3) углубленные механистические исследования роли кишечной микробиоты с применением гнотобиотических моделей и изотопного трейсинга; (4) оптимизация постобработки для сохранения фитохимического профиля в реальных пищевых продуктах; (5) разработка объективных критериев эффективности пророщенного сырья с учетом биодоступности и метаболической судьбы ключевых соединений.

References

1. Бурак Л. Ч., Карбанович В.И. Антиоксидантная активность микрозелени, потенциал использования. Обзор предметного поля // Научное обозрение. Биологические науки. 2023. № 4. С. 58-70. https://doi.org/10.17513/srbs.1342

2. Johnson M.A., Thakur S. Sprouts, microgreens, and baby leaves cultivation in controlled environment agriculture—A panacea for global food and nutritional security // Food Bioscience. 2025. Vol. 73. P. 107579. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107579

3. García S.N.C., Rodríguez-Herrera R., Flores S.N., et al. Sprouts as probiotic carriers: A new trend to improve consumer nutrition // Food Chemistry: Molecular Sciences. 2023. Vol. 7. P. 100185. https://doi.org/10.1016/j.fochms.2023.100185

4. Günal-Köroğlu D., Esatbeyoglu T., Capanoglu E. Effect of germination on the phenolic compounds: Content, bioavailability, food applications, and health benefits // Journal of Food Measurement and Characterization. 2025. Vol. 15. P. 8144–8164. https://doi.org/10.1007/s11694-025-03392-6

5. Bloot A.P.M., Kalschne D.L., Amaral J.A.S., Baraldi I.J., Canan C. A review of phytic acid sources, obtention, and applications // Food Reviews International. 2023. Vol. 39. No. 1. P. 73–92. https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1906697

6. Бурак, Л. Ч. Достижение устойчивого развития за счет использования новых технологий переработки пищевых продуктов / Л. Ч. Бурак, Т. В. Ермошина, Н. В. Саманкова // Фундаментальные исследования. – 2024. – № 10. – С. 171-179. – DOI 10.17513/fr.43705

7. Sun Y., Li C., Lee A. Sprouted grains as a source of bioactive compounds for modulating insulin resistance // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 15. P. 8574. https://doi.org/10.3390/app15158574

8. Cereals & Grains Association. Whole Grains/Food for Thought. 2025. https://www.cerealsgrains.org/FoodforThought/WholeGrains/Pages/default.aspx

9. Garzón A.G., Drago S.R. Free α-amino acids, γ-aminobutyric acid (GABA), phenolic compounds and their relationships with antioxidant properties of sorghum malted in different conditions // Journal of Food Science and Technology. 2018. Vol. 55. No. 8. P. 3188–3198. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3249-0

10. Benincasa P., Falcinelli B., Lutts S., Stagnari F., Galieni A. Sprouted grains: A comprehensive review // Nutrients. 2019. Vol. 11. No. 2. P. 421. https://doi.org/10.3390/nu11020421

11. БуракЛ. Ч. Влияние современных способов обработки и стерилизации на качество плодоовощного сырья и соковой продукции // Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2025. 236 с. https://doi.org/10.12737/0.12737/2154991

12. Majzoobi M., Wang Z., Teimouri S., Pematilleke N., Brennan C.S., Farahnaky A. Unlocking the potential of sprouted cereals, pseudocereals, and pulses in combating malnutrition // Foods. 2023. Vol. 12. No. 21. P. 3901. https://doi.org/10.3390/foods12213901

13. Gunathunga C., Senanayake S., Jayasinghe M.A., et al. Germination effects on nutritional quality: A comprehensive review of selected cereals and pulses changes // Journal of Food Composition and Analysis. 2024. Vol. 128. P. 106024. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106024

14. Günal-Köroğlu D., Esatbeyoglu T., Capanoglu E. Effect of germination on the phenolic compounds: Content, bioavailability, food applications, and health benefits // Journal of Food Measurement and Characterization. 2025. Vol. 15. P. 8144–8164. https://doi.org/10.1007/s11694-025-03392-6

15. Sun Y., Li C., Lee A. Sprouted grains as a source of bioactive compounds for modulating insulin resistance // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 15. P. 8574. https://doi.org/10.3390/app15158574

16. Liu S., Wang W., Lu H., Shu Q., Zhang Y., Chen Q. New perspectives on physiological, biochemical and bioactive components during germination of edible seeds: A review // Trends in Food Science & Technology. 2022. Vol. 123. P. 187–197. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.029

17. Carrera-Castaño G., Calleja-Cabrera J., Pernas M., Gómez L., Oñate-Sánchez L. An updated overview on the regulation of seed germination // Plants. 2020. Vol. 9. No. 6. P. 703. https://doi.org/10.3390/plants9060703

18. Upretee P., Bandara M.S., Tanino K.K. The role of seed characteristics on water uptake preceding germination // Seeds. 2024. Vol. 3. No. 4. P. 559–574. https://doi.org/10.3390/seeds3040038

19. Ali F., Qanmber G., Li F., Wang Z. Updated role of ABA in seed maturation, dormancy, and germination // Journal of Advanced Research. 2022. Vol. 35. P. 199–214. https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.03.011

20. Nautiyal P., Sivasubramaniam K., Dadlani M., eds. Seed Dormancy and Regulation of Germination.

Springer, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_3

21. Bykova N.V., Igamberdiev A.U. Redox control of seed germination is mediated by the crosstalk of nitric oxide and reactive oxygen species // Antioxidants & Redox Signaling. 2025. Vol. 42. No. 7–9. P. 442–461. https://doi.org/10.1089/ars.2024.0699

22. Бурак, Л. Ч., Овсянникова Н. Л. Современные способы хранения и упаковки земляники садовой (Fragaria × ananassa Duch.) (обзор) // Современное садоводство. 2024. № 3. С. 34-54

23. Wang J., Liu C., Zheng X., Hong J., Sun B., Liu M. The structural integrity of endosperm/cotyledon cells and cell modification affect starch digestion properties // Food & Function. 2023. Vol. 14. No. 15. P. 6784–6801. https://doi.org/10.1039/d3fo00856h

24. He H.-J., Qiao J., Liu Y., Guo Q., Ou X., Wang X. Isolation, structural, functional, and bioactive properties of cereal arabinoxylan—A critical review // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2021. Vol. 69. No. 51. P. 15437–15457. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c04506

25. Xu M., Rao J., Chen B. Phenolic compounds in germinated cereal and pulse seeds: Classification, transformation, and metabolic process // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2020. Vol. 60. No. 5. P. 740–759. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1550051

26. Lam L.P.Y., Wang L., Lui A.C., et al. Flavonoids in major cereal grasses: Distribution, functions, biosynthesis, and applications // Phytochemistry Reviews. 2023. Vol. 22. No. 5. P. 1399–1438. https://doi.org/10.1007/s11101-023-09873-0

27. Bhatla S.C., Lal M.A., eds. Secondary Metabolites. Springer Nature Singapore, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5736-1_33

28. Auroux L., Liew L.C., Whelan J., Lewsey M.G. Advances in seed omics // Journal of Experimental Botany. 2025. Vol. 77. P. 2045–2058. https://doi.org/10.1093/jxb/eraf294

29. Peirats-Llobet M., Yi C., Liew L.C., et al. Spatially resolved transcriptomic analysis of the germinating barley grain // Nucleic Acids Research. 2023. Vol. 51. No. 15. P. 7798–7819. https://doi.org/10.1093/nar/gkad521

30. Sano N., Lounifi I., Cueff G., et al. Multi-omics approaches unravel specific features of embryo and endosperm in rice seed germination // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 13. P. 867263. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.867263

31. Khan A., Tian R., Bean S.R., Yerka M., Jiao Y. Transcriptome and metabolome analyses reveal regulatory networks associated with nutrition synthesis in sorghum seeds // Communications Biology. 2024. Vol. 7. No. 1. P. 841. https://doi.org/10.1038/s42003-024-06525-7

32. Ju L., Liu R., Cheng X., et al. Integrated transcriptome, GWAS, and metabolome revealed the mechanism of seed germination in sorghum // Frontiers in Plant Science. 2025. Vol. 16. P. 1601899. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1601899

33. Li D., Liu K., Zhao C., et al. GWAS combined with WGCNA of transcriptome and metabolome to excavate key candidate genes for rice anaerobic germination // Rice. 2023. Vol. 16. No. 1. P. 49. https://doi.org/10.1186/s12284-023-00667-8

34. Hao Y., Hong Y., Guo H., et al. Transcriptomic and metabolomic landscape of quinoa during seed germination // BMC Plant Biology. 2022. Vol. 22. No. 1. P. 237. https://doi.org/10.1186/s12870-022-03621-w

35. Zhang D., Wei X., Liu Z., et al. Transcriptome analysis reveals the molecular mechanism of GABA accumulation during quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) germination // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2021. Vol. 69. No. 41. P. 12171–12186. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c02933

36. Kim M.J., Kwak H.S., Kim S.S. Effects of germination on protein, γ-aminobutyric acid, phenolic acids, and antioxidant capacity in wheat // Molecules. 2018. Vol. 23. No. 9. P. 2244. https://doi.org/10.3390/molecules23092244

37. Xu J.G., Tian C.R., Hu Q.P., Luo J.Y., Wang X.D., Tian X.D. Dynamic changes in phenolic compounds and antioxidant activity in oats (Avena nuda L.) during steeping and germination // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2009. Vol. 57. No. 21. P. 10392–10398. https://doi.org/10.1021/jf902778j

38. Nguyen T.H.D., Nguyen L.L.P., Baranyai L. Influence of sprouting on phenolic acids, carotenoids, and antioxidant activity of millet varieties // Journal of Agriculture and Food Research. 2023. Vol. 14. P. 100810. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100810

39. Makowska A., Waśkiewicz A., Chudy S. Lignans in triticale grain and triticale products // Journal of Cereal Science. 2020. Vol. 93. P. 102939. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102939

40. Katina K., Liukkonen K.-H., Kaukovirta-Norja A., et al. Fermentation-induced changes in the nutritional value of native or germinated rye // Journal of Cereal Science. 2007. Vol. 46. No. 3. P. 348–355. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.07.006

41. Huang M., Chen Q., Li S., He J., Su Y., Wang M. Germination-driven dynamic changes of phenolic compounds in oats and the underlying mechanisms for antioxidation enhancement // Food Chemistry. 2025. Vol. 495. P. 146344. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146344

42. Tian X., Chen L., Sun L., Gong K., Liu K., Guo Y. Omics analysis revealing flavonoid content during maize grain germination // Metabolites. 2025. Vol. 15. No. 2. P. 107. https://doi.org/10.3390/metabo15020107

43. Muthusamy M., Kim J.H., Kim S.H., et al. Changes in beneficial C-glycosylflavones and policosanol content in wheat and barley sprouts subjected to differential LED light conditions // Plants. 2020. Vol. 9. No. 11. P. 1502. https://doi.org/10.3390/plants9111502

44. Lee H.-G., Woo S.-Y., Ahn H.-J., et al. Comparative analysis of policosanols related to growth times from the seedlings of various Korean oat (Avena sativa L.) cultivars and screening for adenosine 5′-monophosphate-activated protein kinase (AMPK) activation // Plants. 2022. Vol. 11. No. 14. P. 1844. https://doi.org/10.3390/plants11141844

45. Adeyeye E.I., Adesina A.J. Enhancement of lipid quality of raw guinea corn (Sorghum bicolor) grains through germination and steeping // Open Journal of Analytical Chemistry Research. 2013. Vol. 1. No. 1. P. 5–17. https://doi.org/10.12966/ojacr.05.02.2013

46. Ziegler J.U., Flockerzie M., Longin C.F.H., Würschum T., Carle R., Schweiggert R.M. Development of lipophilic antioxidants and chloroplasts during the sprouting of diverse Triticum spp. // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2016. Vol. 64. No. 4. P. 913–922. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05474

47. Ng L.-T., Huang S.-H., Chen Y.-T., Su C.-H. Changes of tocopherols, tocotrienols, γ-oryzanol, and γ-aminobutyric acid levels in the germinated brown rice of pigmented and nonpigmented cultivars // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2013. Vol. 61. No. 51. P. 12604–12611. https://doi.org/10.1021/jf403703t

48. Kihara M., Okada Y., Iimure T., Ito K. Accumulation and degradation of two functional constituents, GABA and β-glucan, and their varietal differences in germinated barley grains // Breeding Science. 2007. Vol. 57. No. 2. P. 85–89. https://doi.org/10.1270/jsbbs.57.85

49. Sharma S., Saxena D.C., Riar C.S. Changes in the GABA and polyphenols contents of foxtail millet on germination and their relationship with in vitro antioxidant activity // Food Chemistry. 2018. Vol. 245. P. 863–870.
https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.093

50. Kong L., Lin Y., Liang J., et al. Dynamic changes in vitamin E biosynthesis during germination in brown rice (Oryza sativa L.) // Foods. 2022. Vol. 11. No. 20. P. 3200. https://doi.org/10.3390/foods11203200

51. Tanwir F., Dionisio G., Adhikari K.B., Fomsgaard I.S., Gregersen P.L. Biosynthesis and chemical transformation of benzoxazinoids in rye during seed germination and the identification of a rye Bx6-like gene // Phytochemistry. 2017. Vol. 140. P. 95–107. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2017.04.020

52. Baranzelli J., Somacal S., Monteiro C.S., et al. Grain germination changes the profile of phenolic compounds and benzoxazinoids in wheat: A study on hard and soft cultivars // Molecules. 2023. Vol. 28. No. 2. P. 721. https://doi.org/10.3390/molecules28020721

53. Živković A., Gođevac D., Cigić B., Polak T., Požrl T. Identification and quantification of selected benzoxazinoids and phenolics in germinated spelt (Triticum spelta) // Foods. 2023. Vol. 12. No. 9. P. 1769. https://doi.org/10.3390/foods12091769

54. Lee P.-S., Hu J., Sang S. Phytochemical-rich germinated oats as a novel functional food to attenuate gut inflammation // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2025. Vol. 73. No. 25. P. 15706–15716. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c02993

55. Feng Y., Suo D., Guan X., et al. Effect of germination on the avenanthramide content of oats and their in vitro antisensitivity activities // Molecules. 2022. Vol. 27. No. 19. P. 6167. https://doi.org/10.3390/molecules27196167

56. Hu J., Hu C., Zhao Y., Lee P.-S., Sang S. Germination and false germination increase the levels of bioactive steroidal saponins in oats // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2025. Vol. 73. No. 3. P. 1940–1951. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c09989

57. Hafez-Ghoran S., Wang W., Sang S. Germination under the dark as an efficient method to enrich barley hordatine aglycones and to prepare a hordatine-rich fraction // Food Chemistry. 2025. Vol. 472. P. 142963. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.142963

58. Banchuen J., Thammarutwasik P., Ooraikul B., Wuttijumnong P., Sirivongpaisal P. Effect of germinating processes on bioactive component of Sangyod Muang Phatthalung rice // Thai Journal of Agricultural Science. 2009. Vol. 42. No. 4. P. 191–199.

59. Hasan M., Quan N.V., Anh H., Khanh T.D., Xuan T.D. Salinity treatments promote the accumulations of momilactones and phenolic compounds in germinated brown rice // Foods. 2023. Vol. 12. No. 13. P. 2501. https://doi.org/10.3390/foods12132501

60. Galland M., Boutet-Mercey S., Lounifi I., et al. Compartmentation and dynamics of flavone metabolism in dry and germinated rice seeds // Plant and Cell Physiology. 2014. Vol. 55. No. 9. P. 1646–1659. https://doi.org/10.1093/pcp/pcu095

61. Borgonovi S.M., Marzocchi S., Pasini F., et al. Exploring germination to unlock the nutritional potential of sorghum (Sorghum bicolor) // Molecules. 2025. Vol. 30. No. 17. P. 3622. https://doi.org/10.3390/molecules30173622

62. Dhakal H., Yang E.-J., Lee S., et al. Avenanthramide C from germinated oats exhibits anti-allergic inflammatory effects in mast cells // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. No. 1. P. 6884. https://doi.org/10.1038/s41598-019-43412-2

63. Lee H.J., Kim K.J., Park S.-y., et al. Enhancing intestinal health with germinated oats: Bioinformatics and compound profiling insights into a novel approach for managing inflammatory bowel disease // Food Bioscience. 2024. Vol. 61. P. 104833. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104833

64. Hao C.-L., Lin H.-L., Ke L.-Y., Yen H.-W., Shen K.-P. Pre-germinated brown rice extract ameliorates high-fat diet-induced metabolic syndrome // Journal of Food Biochemistry. 2019. Vol. 43. No. 3. P. e12769. https://doi.org/10.1111/jfbc.12769

65. Cao W., Tucker A., Hoang A., Abdi R., Wright A., Joye I.J. The effect of sprouted wheat wholemeal inclusion in bread recipes on postprandial blood glucose and satiety responses in healthy adults: A randomized trial // Journal of Functional Foods. 2024. Vol. 121. P. 106447. https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106447

66. Zhao F., Ren C., Li L., et al. Effects of germinated brown rice and germinated black rice on people with type 2 diabetes mellitus combined with dyslipidaemia // Food & Function. 2024. Vol. 15. No. 12. P. 6642–6656. https://doi.org/10.1039/D3FO05070J

67. Ding Q., Ren J., Zhou Y., et al. Whole grain germinated brown rice regulates intestinal immune homeostasis and gastrointestinal hormones in type 2 diabetic patients—A randomized control trial // Food & Function. 2022. Vol. 13. No. 15. P. 8274–8282. https://doi.org/10.1039/d2fo00477a

68. Ren C., Hong B., Zhang S., et al. Autoclaving-treated germinated brown rice relieves hyperlipidemia

by modulating gut microbiota in humans // Frontiers in Nutrition. 2024. Vol. 11. P. 1403200. https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1403200

69. Wu B.-N., Lin H.-L., Su H.-J., et al. Comparison of the efficacy of pre-germinated brown rice extract and γ-oryzanol against non-alcoholic fatty liver disease and cardiac complications induced by a high-fructose/fat diet // Journal of Nutritional Science and Vitaminology. 2025. Vol. 71. No. 4. P. 321–330. https://doi.org/10.3177/jnsv.71.321

70. Corzo-Ríos L.J., Garduño-Siciliano L., Sánchez-Chino X.M., Martínez-Herrera J., Cardador-Martínez A., Jiménez-Martínez C. Effect of the consumption of amaranth seeds and their sprouts on alterations of lipids and glucose metabolism in mice // International Journal of Food Science & Technology. 2021. Vol. 56. No. 7. P. 3269–3277. https://doi.org/10.1111/ijfs.15014

71. Zhao R., Huang F., Liu C., et al. Impact of germinated brown rice and brown rice on metabolism, inflammation, and gut microbiome in high fat diet-induced insulin resistant mice // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2022. Vol. 70. No. 44. P. 14235–14246. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c06662

72. Imam M.U., Musa S.N., Azmi N.H., Ismail M. Effects of white rice, brown rice and germinated brown rice on antioxidant status of type 2 diabetic rats // International Journal of Molecular Sciences. 2012. Vol. 13. No. 10. P. 12952–12969. https://doi.org/10.3390/ijms131012952

73. Nan G., Zhao H., Wu Q., et al. Comparative study of the effects of tartary buckwheat seed and sprout consumption on the physiological indices and gut microbiota of C57BL/6J mice // Food Science and Human Wellness. 2024. Vol. 13. No. 2. P. 791–800. https://doi.org/10.26599/FSHW.2022.9250067

74. Merendino N., Molinari R., Costantini L., et al. A new "functional" pasta containing tartary buckwheat sprouts as an ingredient improves the oxidative status and normalizes some blood pressure parameters in spontaneously hypertensive rats // Food & Function. 2014. Vol. 5. No. 5. P. 1017–1026. https://doi.org/10.1039/C3FO60683J

75. Zhou J., Lv W., Li Z., Wang L., Guo B., Du D. Sprouted black quinoa extract alleviates heat stress-induced liver injury in rats by activating Nrf2 signaling and suppressing the NF-κB/NLRP3 inflammasome pathway // Foods. 2025. Vol. 14. No. 16. P. 2758. https://doi.org/10.3390/foods14162758

76. Borgonovi S.M., Chiarello E., Pasini F., et al. Effect of sprouting on biomolecular and antioxidant features of common buckwheat (Fagopyrum esculentum) // Foods. 2023. Vol. 12. No. 10. P. 2047. https://doi.org/10.3390/foods12102047

77. Tantipaiboonwong P., Pintha K., Kangwan N., Mann D., Riyamongkhol P., Jeefoo W.P. Neuroprotective effects of γ-aminobutyric acid-enriched germinated riceberry extract in cerebral ischemic reperfusion-induced cognitive impairment mice // Journal of Applied Pharmaceutical Science. 2024. Vol. 14. No. 10. P. 95–104. https://doi.org/10.7324/JAPS.2024.175285

78. Ismail N., Ismail M., Fathy S.F., et al. Neuroprotective effects of germinated brown rice against hydrogen peroxide induced cell death in human SH-SY5Y cells // International Journal of Molecular Sciences. 2012. Vol. 13. No. 8. P. 9692–9708. https://doi.org/10.3390/ijms13089692

79. Soi-ampornkul R., Junnu S., Kanyok S., Liammongkolkul S., Katanyoo W., Umpornsirirat S. Antioxidative and neuroprotective activities of the pre-germinated brown rice extract // Food and Nutrition Sciences. 2012. Vol. 3. No. 1. P. 135–140. https://doi.org/10.4236/fns.2012.31020

80. Han S., Wu X., Zhu L., et al. Whole grain germinated brown rice intake modulates the gut microbiota and alleviates hypertriglyceridemia and hypercholesterolemia in high fat diet-fed mice // Food & Function. 2024. Vol. 15. No. 1. P. 265–283. https://doi.org/10.1039/d3fo03288d

81. Naumenko N., Potoroko I., Kalinina I. Stimulation of antioxidant activity and γ-aminobutyric acid synthesis in germinated wheat grain Triticum aestivum L. by ultrasound: Increasing the nutritional value of the product // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. Vol. 86. P. 106000.
https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106000

82. Бурак Л. Ч., Сапач А.Н. Влияние предварительной обработки импульсным электрическим полем на процесс сушки: обзор предметного поля // Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 2. С. 44-71 https://doi.org/10.36107/spfp.2023.418

83. Yodpitak S., Mahatheeranont S., Boonyawan D., Sookwong P., Roytrakul S., Norkaew O. Cold plasma treatment to improve germination and enhance the bioactive phytochemical content of germinated brown rice // Food Chemistry. 2019. Vol. 289. P. 328–339. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.061

84. Song J.-S., Lee M.J., Ra J.E., et al. Growth and bioactive phytochemicals in barley (Hordeum vulgare L.) sprouts affected by atmospheric pressure plasma during seed germination // Journal of Physics D: Applied Physics. 2020. Vol. 53. No. 31. P. 314002. https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab810d

85. Zhang J., Guo J., Dang B., Zhang W., Zheng W., Yang X. Enhancement of polyphenols and antioxidant activity in germinated black highland barley by ultrasonication // Molecules. 2023. Vol. 28. No. 9. P. 3679. https://doi.org/10.3390/molecules28093679

86. Ding J., Johnson J., Chu Y.F., Feng H. Enhancement of γ-aminobutyric acid, avenanthramides, and other health-promoting metabolites in germinating oats (Avena sativa L.) treated with and without power ultrasound // Food Chemistry. 2019. Vol. 283. P. 239–247. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.136

87. Lee M.J., Lee H.-J., Lee Y., et al. Cold plasma treatment increases bioactive metabolites in oat (Avena sativa L.) sprouts and enhances in vitro osteogenic activity of their extracts // Plant Foods for Human Nutrition. 2023. Vol. 78. No. 1. P. 146–153. https://doi.org/10.1007/s11130-022-01029-3

88. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н., Завалей А.П. Влияние обработки холодной плазмой на качество и пищевую ценность растительного сырья. Обзор предметного поля // Известия вузов. Прикладная

химия и биотехнология. 2024. 14, 2. 173–183 https://doi.org/10.21285/achb.914

89. Zhang B., Wen T., Xiang N., Zhao Y., Guo X. Effect of ultrasonic pretreatment on tocochromanol and carotenoid biofortification in maize (Zea mays L.) seedlings // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2023. Vol. 103. No. 3. P. 1412–1420. https://doi.org/10.1002/jsfa.12235

90. Deore A., Athmaselvi K., Venkatachalapathy N. Effect of ultrasound and microwave pretreatment on sprouting, GABA, bioactive compounds, and other physicochemical properties of sorghum // Grain & Oil Science and Technology. 2023. Vol. 6. No. 2. P. 91–99. https://doi.org/10.1016/j.gaost.2023.02.002

91. Бурак Л. Ч., Сапач А.Н. Влияние действия ультразвука на функциональные свойства растительных белков. Обзор предметного поля // Химия растительного сырья. 2024. № 4. С. 5-23. https://doi.org/10.14258/jcprm.20240413599

92. Altıkardeş E., Güzel N. Impact of germination pre-treatments on buckwheat and quinoa: Mitigation of anti-nutrient content and enhancement of antioxidant properties // Food Chemistry: X. 2024. Vol. 21. P. 101182. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101182

93. Hiran P., Kerdchoechuen O., Laohakunjit N. Combined effects of fermentation and germination on nutritional compositions, functional properties and volatiles of maize seeds // Journal of Cereal Science. 2016. Vol. 71. P. 207–216. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.09.001

94. Mencin M., Jamnik P., Mikulič Petkovšek M., Veberič R., Terpinc P. Improving accessibility and bioactivity of raw, germinated and enzymatic-treated spelt (Triticum spelta L.) seed antioxidants by fermentation // Food Chemistry. 2022. Vol. 394. P. 133483. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133483

95. Yuan D., Zhang S., Hong B., et al. Dual bioconversion strategy: Synergistic germination and Lactobacillus fermentation engineering for a γ-aminobutyric acid-enriched beverage from brown rice // Foods. 2025. Vol. 14. No. 15. P. 2733. https://doi.org/10.3390/foods14152733

96. Zhu C., Yang L., Wu Y., Sun X., Song L. Effects of variable temperature drying on total flavonoids, amino acids, and antioxidative characteristics along with textural properties of germinated brown rice // Food Science and Technology. 2023. Vol. 43. P. e1523. https://doi.org/10.5327/fst.1523

97. Ge X., Saleh A.S.M., Jing L., et al. Germination and drying induced changes in the composition and content of phenolic compounds in naked barley // Journal of Food Composition and Analysis. 2021. Vol. 95. P. 103594. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103594

98. Toyoizumi T., Kosugi T., Toyama Y., Nakajima T. Effects of high-temperature cooking on the gamma-aminobutyric acid content and antioxidant capacity of germinated brown rice (Oryza sativa L.) // CyTA—Journal of Food. 2021. Vol. 19. No. 1. P. 360–369. https://doi.org/10.1080/19476337.2021.1905721

99. Wang H.-J., Chang L., Lin Y.-S. Changes in functionality of germinated and non-germinated brown rice fermented by Bacillus natto // Foods. 2021. Vol. 10. No. 11. P. 2779. https://doi.org/10.3390/foods10112779

100. Бурак Л. Ч. Влияние ферментации Lactobacillus plantarum на химический состав и пищевую ценность плодовоягодного сырья // Инновации и продовольственная безопасность. 2025. № 2(48). С. 6-25. https://doi.org/10.31677/2311-0651-2025-48-2-6-25

101. Бурак Л. Ч. Современные методы бланширования и их влияние на процесс сушки фруктов и овощей // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2025. Т. 28, № 2. С. 273-295. https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-273-295

102. Burak L. Ch., Sapach A. N., Lukin A.A. Non-thermal methods of processing fruit puree: impact on microbiological safety and nutrient preservation. Review // Innovations and food security. 2026. Vol. 14, No. 2. P. 24-50 https://doi.org /10.31677/2311-0651-2026-14-2-24-50

ECONOMIC SCIENCES

RANKING OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS IN UKRAINE BASED ON THE RESULTS OF STATE CERTIFICATION OF SCIENTIFIC ACTIVITY

Dmytriiev I.
Kharkiv National Automobile and Highway University,
Vice-Rector for Scientific Work, Doctor of Economic Sciences, Professor
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8693-3706
Shevchenko I.
Kharkiv National Automobile and Highway University,
Professor of the Department of Economics and Entrepreneurship,
Doctor of Economic Sciences, Professor
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0758-9244
DOI: 10.5281/zenodo.22091534

Abstract
The article presents the author's approach to rating higher education institutions based on the results of state certification of scientific activity. The methodological approach is based on ranking higher education institutions by the total score based on the results of state certification of scientific activity from the maximum score to the minimum score, formed according to the following criteria for scientific directions: "group A" − 5 points; "group B" − 4 points; "group C" – 2 points; "group D" − minus 1 point; the higher education institution did not apply for state certification of scientific activity in the scientific direction − 0 points. Using the developed approach, 148 higher education institutions were rated based on the results of state certification of scientific activity.
Keywords: rating, higher education institution, state certification, scientific activity.

Introduction.

In 2026, a new model of basic financing of scientific activity was introduced in Ukraine, which is based on the results of state certification of scientific activity by scientific directions in higher education institutions and scientific institutions.

At the time of the study, within the framework of state certification of scientific activity by scientific directions, experts assessed 708 certification cases, including 371 certification cases of 148 higher education institutions [1].

At the time of the study, state certification of higher education institutions in six scientific directions was completed, namely:

− agricultural and veterinary direction (AVD);
− biomedical direction (BD);
− humanitarian and artistic direction (HAD);
− engineering and technological direction (ETD);
− natural and mathematical direction (NMD);
− social direction (SD).

Currently, state certification of scientific activity of higher education institutions in the latest scientific direction – "Security direction" is underway.

It should be noted that the submission of applications by higher education institutions for state certification of scientific activity in scientific directions was voluntary: higher education institutions independently selected scientific directions for their state certification. That is, even in the case of conducting scientific research in a certain scientific direction, the higher education institution independently made a decision on whether to apply for state certification in this scientific direction.

According to the "Methodology for assessing the effectiveness of scientific (scientific and technical) activities of scientific institutions and higher education institutions in terms of the implementation by such institutions of scientific (scientific and technical) activities in individual scientific directions during state certification" [2], according to the results of state certification, based on the received certification score, a higher education institution can be assigned to one of four groups depending on the limits within which the received certification score falls:

− "group A" − more than 75% (inclusive);
− "group B" − from 50% (inclusive) to 75%;
− "group C" − from 25% (inclusive) to 50%;
− "group D" − less than 25%.

In this case, "group A" and "group B" are considered as certified with the subsequent provision of state funding. "Group C" is considered as certified without the subsequent provision of state funding. "Group D" is considered as not having passed state certification of scientific activity by scientific direction.

The NAUKA information system provides comprehensive information on the results of the state certification of scientific activity of all higher education institutions in selected scientific directions. The NAUKA information system also has the functionality to view the results of the state certification of scientific activity in all scientific directions of selected higher education institutions. Thus, the NAUKA information system does not contain a consolidated database that would simultaneously illustrate the results of state certification of scientific activity in all scientific directions of all higher education institutions.

There is also no approach to ranking higher education institutions based on the results of state certification of scientific activity.

Objective of the work.

The purpose of this study is to develop and test the author's methodological approach to rating higher education institutions based on the results of state certification of their scientific activities.

Presentation of the main research material.

Taking into account the peculiarities of interpreting the success of a higher education institution's scientific activity in the event of falling into one of the four above-mentioned groups, we propose to convert the groups into point scores as follows for the purpose of ranking higher education institutions based on the results of state certification of scientific directions:

− "group A" − 5 points;
− "group B" − 4 points;
− "group C" – 2 points;
− "group D" − minus 1 point.

If a higher education institution does not apply for state certification in a certain scientific direction, then in this case it is assigned zero points.

After converting groups into points, the total score of the higher education institution is calculated.

The ranking of higher education institutions based on the calculated total score is carried out from the maximum score to the minimum score.

If several higher education institutions receive the same total score, then a higher ranking place is assigned to the higher education institution that is characterized by higher efficiency of scientific activity according to the results of state certification: for example, if two higher education institutions received a total score of 9 points, but for the first higher education institution this score was formed from 5 points in one scientific direction ("group A") and 4 points in another scientific direction ("group B"), and for the second higher education institution the total score consists of 5 points in one scientific direction ("group A") and 2 points in the other two scientific directions ("group C"), then a higher ranking place will be assigned to the first higher education institution.

Also, when assigning ranking places to higher education institutions with the same total score, the higher education institution's placement in "group D" is taken into account: for example, if two higher education institutions received a total score of 4 points, but for the first higher education institution this score was formed from 4 points in one scientific direction ("group B"), and for the second higher education institution the total score consists of 5 points in one scientific direction ("group A") and minus 1 point in another scientific direction ("group D"), then the higher ranking place will be assigned to the first higher education institution.

Having outlined the key provisions of the author's approach to rating higher education institutions based on the results of state certification of scientific activity, we will implement this approach in practice, using the orders of the Ministry of Education and Science of Ukraine [3−6] as an information base.

Table 1 contains the results of practical testing of the methodological approach developed by the authors to rating higher education institutions in Ukraine based on the results of state certification of scientific activity.

Table 1

Rating of higher education institutions in Ukraine based on the results of state certification of scientific activity

Higher education institutions	Points based on the results of the state certification of scientific activity by scientific directions:						Total score, points	Rating (place)
	SD	NMD	ETD	HAD	BD	AVD		
Sumy State University	5	5	5	5	5	0	25	1
Taras Shevchenko National University of Kyiv	5	5	2	4	4	0	20	2
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine	5	0	5	4	0	5	19	3
Lviv Polytechnic National University	4	5	5	5	0	0	19	3
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	4	2	5	4	4	0	19	5
V.N. Karazin Kharkiv National University	5	5	4	2	2	0	18	6
Lesya Ukrainka Volyn National University	4	4	0	5	4	0	17	7
Zaporizhzhia National University	4	4	4	5	0	0	17	7
Dnipro University of Technology	4	4	5	4	0	0	17	7
Oles Honchar Dnipro National University	2	5	4	4	2	0	17	10
Vasyl' Stus Donetsk National University	5	4	2	5	0	0	16	11
National University of "Kyiv-Mohyla Academy"	5	4	2	5	0	0	16	11
Kyiv National University	4	0	5	4	2	0	15	13

of Technologies and Design								
Sumy National Agrarian University	4	0	4	0	2	5	15	13
Petro Mohyla Black Sea National University	4	0	4	5	2	0	15	13
I.I. Mechnikov Odesa National University	2	4	2	2	5	0	15	16
Ivan Franko National University of Lviv	2	5	2	5	0	0	14	17
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas	4	4	5	0	0	0	13	18
Mykhailo Dragomanov Ukrainian State University	4	4	0	5	0	0	13	18
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University	4	0	4	4	0	0	12	20
Mykhailo Kotsiubynskyi Vinnytsia State Pedagogical University	4	2	0	4	2	0	12	21
Polissia National University	4	4	2	0	0	2	12	21
Kherson State University	2	4	0	4	2	0	12	21
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University	2	4	2	4	0	0	12	21
Vasyl Stefanyk Carpathian National University	2	5	2	4	-1	0	12	25
Uzhhorod National University	2	5	2	0	4	-1	12	25
Ukrainian State University of Science and Technologies	4	0	5	2	0	0	11	27
H.S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University	2	4	0	5	0	0	11	27
National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”	0	5	5	0	0	0	10	29
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv	0	5	5	0	0	0	10	29
Berdyansk State Pedagogical University	2	4	0	4	0	0	10	31
Mykhailo Ostrohradskyi Kremenchuk National University	2	4	4	0	0	0	10	31
Lutsk National Technical University	4	2	4	0	0	0	10	31
National Transport University	2	4	4	0	0	0	10	31
National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”	4	0	4	2	0	0	10	31
Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University	2	4	0	4	0	0	10	31
Khmelnytskyi National University	2	0	4	2	2	0	10	37
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics	5	0	4	0	0	0	9	38
Ivan Puluj Ternopil National Technical University	4	-1	4	0	0	2	9	39
West Ukrainian National University	4	2	2	-1	0	2	9	40
National University of Water and Environmental Engineering	4	2	5	0	-1	-1	9	41
State University of Trade and Economics	4	0	4	0	0	0	8	42

Zhytomyr Polytechnic State University	4	0	4	0	0	0	8	42
National University of Ostroh Academy	4	0	0	4	0	0	8	42
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University	4	0	0	0	0	4	8	42
Kharkiv National Automobile and Highway University	4	0	4	0	0	0	8	42
Ivan Franko Drohobych State Pedagogical University	4	2	0	2	0	0	8	47
Ivan Franko Zhytomyr State University	2	2	0	4	0	0	8	47
Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman	4	0	2	2	0	0	8	47
Kryvyi Rih National University	2	2	4	0	0	0	8	47
Mariupol State University	2	0	2	4	0	0	8	47
National University “Zaporizhzhia Polytechnic”	2	2	4	0	0	0	8	47
Mykola Gogol Nizhyn State University	2	2	0	4	0	0	8	47
South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushynsky	2	4	0	2	0	0	8	47
Poltava State Agrarian University	4	0	2	0	0	2	8	47
Kherson State Agrarian and Economic University	2	0	2	0	0	4	8	47
Kyiv National University of Construction and Architecture	2	-1	5	2	0	0	8	57
Chernihiv Polytechnic National University	4	0	5	-1	0	-1	7	58
Vinnytsia National Agrarian University	0	0	4	0	0	2	6	59
National University “Kyiv Aviation Institute”	2	0	4	0	0	0	6	59
Mykolaiv National Agrarian University	2	0	0	0	0	4	6	59
Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University	4	2	0	0	0	0	6	59
Admiral Makarov National University of Shipbuilding	0	4	2	0	0	0	6	59
Odesa Polytechnic National University	2	0	4	0	0	0	6	59
National University of Food Technologies	2	0	4	0	0	0	6	59
Odesa National University of Technology	2	0	4	0	0	0	6	59
V.G. Korolenko Poltava National Pedagogical University	0	2	0	4	0	0	6	59
Pryazovskyi State Technical University	2	0	4	0	0	0	6	59
Izmail State University of Humanities	2	2	0	2	0	0	6	69
Kryvyi Rih State Pedagogical University	2	2	0	2	0	0	6	69
Taras Shevchenko Luhansk National University	2	2	0	2	0	0	6	69
Uman National University of Horticulture	2	0	2	0	0	2	6	69
Hryhorii Skovoroda University in Pereiaslav	2	2	0	2	0	0	6	69

Cherkasy State Technological University	2	0	2	2	0	0	6	69
Bukovinian State Medical University	0	0	0	0	5	0	5	75
Dnipro State Medical University	0	0	0	0	5	0	5	75
Danylo Halytsky Lviv National Medical University	0	0	0	0	5	0	5	75
National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”	0	0	5	0	0	0	5	75
National University of Pharmacy	0	0	0	0	5	0	5	75
Yaroslav Mudryi National Law University	5	0	0	0	0	0	5	75
Kharkiv National Medical University	0	0	0	0	5	0	5	75
Kharkiv National University of Radio Electronics	0	0	5	0	0	0	5	75
Donbas State Pedagogical University	2	-1	0	4	0	0	5	83
Ukrainian National Forestry University	-1	0	2	0	0	4	5	83
Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy	-1	2	0	4	0	0	5	83
National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia	0	0	0	0	4	0	4	86
Vinnytsia National Technical University	0	0	4	0	0	0	4	86
State Biotechnological University	0	0	4	0	0	0	4	86
Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University	0	0	0	0	4	0	4	86
Lviv National Academy of Arts	0	0	0	4	0	0	4	86
Mukachevo State University	4	0	0	0	0	0	4	86
Odesa National Economic University	4	0	0	0	0	0	4	86
Poltava State Medical University	0	0	0	0	4	0	4	86
Kyiv School of Economics	4	0	0	0	0	0	4	86
Bila Tserkva National Agrarian University	2	0	0	0	0	2	4	95
Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University	2	0	0	2	0	0	4	95
Dnipro State Agrarian and Economic University	2	0	0	0	0	2	4	95
Donetsk National Technical University	2	0	2	0	0	0	4	95
National University of Ukraine on Physical Education and Sport	2	0	0	0	2	0	4	95
Odesa State Agrarian University	2	0	0	0	0	2	4	95
Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University	2	0	0	2	0	0	4	95
Kherson National Technical University	2	0	2	0	0	0	4	95
Central Ukrainian National Technical University	2	0	2	0	0	0	4	95
O.O. Bogomolets National Medical University	-1	0	0	0	5	0	4	104
I. Horbachevsky Ternopil National Medical University	0	0	0	-1	5	0	4	104

Kyiv National Linguistic University	-1	0	0	4	0	0	3	106
Kherson State Maritime Academy	-1	0	4	0	0	0	3	106
State University of Infrastructure and Technologies	2	-1	2	0	0	0	3	108
Donbas State Engineering Academy	-1	2	2	0	0	0	3	108
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture	2	-1	2	0	0	0	3	108
University of Customs and Finance	2	0	-1	2	0	0	3	108
Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University	2	2	0	-1	0	0	3	108
State Tax University	2	0	0	0	0	0	2	113
State University of Information and Communication Technologies	0	0	2	0	0	0	2	113
Dnipro State Technical University	0	0	2	0	0	0	2	113
Ivano-Frankivsk National Medical University	0	0	0	0	2	0	2	113
R. Glier Kyiv Municipal Academy of Music	0	0	0	2	0	0	2	113
Kyiv National University of Culture and Arts	0	0	0	2	0	0	2	113
Kyiv University of Law of the National Academy of Sciences of Ukraine	2	0	0	0	0	0	2	113
Ivan Boberskyi Lviv State University of Physical Culture	2	0	0	0	0	0	2	113
International University	2	0	0	0	0	0	2	113
National Academy of Management	2	0	0	0	0	0	2	113
P.L. Shupyk National Healthcare University of Ukraine	0	0	0	0	2	0	2	113
Odesa National Medical University	0	0	0	0	2	0	2	113
Prydniprovsk State Academy of Physical Culture and Sport	2	0	0	0	0	0	2	113
Ukrainian Military Medical Academy	0	0	0	0	2	0	2	113
Kharkiv State Academy of Design and Arts	0	0	0	2	0	0	2	113
National University “Odesa Law Academy”	4	0	-1	-1	0	0	2	128
T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”	-1	-1	0	4	0	0	2	128
National University “Odessa Maritime Academy”	2	0	-1	0	0	0	1	130
Sumy State Pedagogical University named after A.S. Makarenko	2	-1	0	0	0	0	1	130
Ukrainian State University of Railway Transport	-1	0	2	0	0	0	1	130
Kharkiv State Academy of Physical Culture	-1	0	0	0	2	0	1	130
Ivan Ohienko Kamianets-Podilskyi National University	2	-1	-1	2	-1	0	1	134

Podillia State University	-1	0	2	0	0	-1	0	135
Rivne State University of the Humanities	-1	-1	0	2	0	0	0	135
V.I. Vernadsky Taurida National University	-1	0	2	-1	0	0	0	135
Dnipro Academy of Continuing Education	-1	0	0	0	0	0	-1	138
Donetsk National Medical University	0	0	0	0	-1	0	-1	138
Luhansk State Medical University	0	0	0	0	-1	0	-1	138
National Academy of Fine Arts and Architecture	0	0	0	-1	0	0	-1	138
National Music Academy of Ukraine	0	0	0	-1	0	0	-1	138
University of Educational Management	-1	0	0	0	0	0	-1	138
Kharkiv National University of Air Forces named after Ivan Kozhedub	0	0	-1	0	0	0	-1	138
Khmelnytskyi Humanitarian-Pedagogical Academy	-1	0	0	0	0	0	-1	138
State University of Economics and Technology	0	0	-1	-1	0	0	-2	146
Odessa National Maritime University	-1	0	-1	-1	0	0	-3	147
Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S.Z. Gzhytskyi	-1	-1	-1	0	-1	-1	-5	148

Source: developed by the authors.

Conclusions.

The ranking of higher education institutions presented by the authors based on the results of state certification of scientific activity is an initial step for a visual comparison of the effectiveness of scientific activity of universities, academies, and institutes in Ukraine.

Prospects for further research include taking into account the significant differentiation of higher education institutions in terms of scale and specificity of scientific activity.

Such consideration may take the form of using correction coefficients when forming the total score of a higher education institution depending on the presence/absence of a scientific direction in which the higher education institution did not apply for state certification of scientific activity. Thus, given the frequent industry-specific nature of non-classical higher education institutions, such universities, academies, and institutes conduct scientific research in only one or two directions (for example, agricultural higher education institutions − in the agricultural-veterinary and engineering-technological directions; medical higher education institutions − in the biomedical direction; economic and legal higher education institutions − in the social direction; art higher education institutions − in the humanitarian and artistic direction, etc.). While there are higher education institutions that deliberately do not submit applications for state certification of scientific activity in certain directions in which they actually conduct scientific research, but consider the indicators in these scientific directions unable to pass state certification. These two different situations − the impossibility of submitting an application due to the lack of a scientific direction and the deliberate refusal to submit an application in the presence of a scientific direction − should be taken into account in the future when forming the total score of a higher education institution based on the results of state certification of scientific activity.

References

1. Державна атестація. *Інформаційна система NAUKA.* URL: https://data.nauka.gov.ua/dashboard-attestation/

2. Про державну атестацію наукових установ та закладів вищої освіти в частині провадження такими закладами наукової (науково-технічної) діяльності: Наказ Міністерства освіти і науки України від 21.10.2024 № 1485. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1743-24

3. Про затвердження Висновків про результати державної атестації наукових установ та закладів вищої освіти в частині провадження такими закладами наукової (науково-технічної) діяльності за науковими напрямами «Аграрно-ветеринарний» та «Суспільний»: Наказ Міністерства освіти і науки України від 27.06.2025 № 945. URL: https://mon.gov.ua/npa/pro-zatverdzhennia-vysnovkiv-pro-rezultaty-derzhavnoi-atestatsii-naukovykh-ustanov-ta-zakladiv-vyshchoi-osvity-v-chastyni-provadzhennia-takymy-zakladamy-naukovoi-naukovo-tekhnichnoi-diialnost

4. Про затвердження Висновків про результати державної атестації наукових установ та закладів вищої освіти в частині провадження такими закладами наукової (науково-технічної) діяльності за науковими напрямами «Інженерно-технологічний» та «Природничо-математичний»: Наказ Міністерства освіти і науки України від 15.10.2025 № 1360. URL: https://mon.gov.ua/npa/pro-zatverdzhennia-vysnovkiv-pro-rezultaty-derzhavnoi-atestatsii-naukovykh-ustanov-ta-zakladiv-vyshchoi-osvity-v-chastyni-provadzhennia-takymy-zakladamy-naukovoi-naukovo-tekhnichnoi-diialno-2

5. Про затвердження Висновків про результати державної атестації наукових установ та закладів вищої освіти в частині провадження такими закладами наукової (науково-технічної) діяльності за науковими напрямами «Біомедичний» та «Гуманітарно-мистецький»: Наказ Міністерства освіти і науки України від 28.11.2025 № 1561. URL: https://mon.gov.ua/npa/pro-zatverdzhennia-vysnovkiv-pro-rezultaty-derzhavnoi-atestatsii-naukovykh-ustanov-ta-zakladiv-vyshchoi-osvity-v-chastyni-provadzhennia-takymy-zakladamy-naukovoi-naukovo-tekhnichnoi-diialno-3

6. Про затвердження Висновків про результати державної атестації наукових установ та закладів вищої освіти в частині провадження такими закладами наукової (науково-технічної) діяльності за науковими напрямами «Біомедичний», «Гуманітарно-мистецький», «Суспільний», «Природничо-математичний» та «Інженерно-технологічний»: Наказ Міністерства освіти і науки України від 29.05.2026 № 864. URL: https://mon.gov.ua/npa/pro-zatverdzhennia-vysnovkiv-pro-rezultaty-derzhavnoi-atestatsii-naukovykh-ustanov-ta-zakladiv-vyshchoi-osvity-v-chastyni-provadzhennia-takymy-zakladamy-naukovoi-naukovo-tekhnichnoi-diialno-4

HISTORICAL AND ARCHEOLOGICAL SCIENCES

СТАНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК ВІДОМЧОЇ НАГОРОДНОЇ СИСТЕМИ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ (1996–2014)

Мисько С.Ю.
магістр державного управління, здобувач кафедри
Національного університету оборони України (Київ, Україна)
https://orcid.org/0000-0003-1312-0864

FORMATION AND DEVELOPMENT OF THE DEPARTMENTAL AWARD SYSTEM OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE (1996–2014)

Mysko S.
Master of Public Administration, Postgraduate Researcher of the Academic Department
The National Defense University of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
https://orcid.org/0000-0003-1312-0864
DOI: 10.5281/zenodo.22091555

Анотація

У статті *досліджено* процес становлення та розвитку відомчої нагородної системи Збройних Сил України у 1996–2014 рр. *Розглянуто* організаційно-правові засади формування системи заохочувальних відзнак у контексті реформування сектору безпеки і оборони України та розмежування повноважень між Міністерством оборони та Генеральним штабом Збройних Сил України. *Проаналізовано* інституційні перетворення 2005 р., які стали імпульсом до запровадження власних нагородних інструментів. *Доведено*, що попри бюрократичні перепони та нормативні колізії, нагородна система пройшла значний еволюційний шлях – від первинних заохочень до ієрархічно вибудуваної структури (включно з відзнакою «Слава і честь»). Вона стала важливим інструментом морального стимулювання й зміцнення військових традицій, а її історичний досвід є необхідним для вдосконалення сучасних підходів до відомчої фалеристики, геральдики та мотивації особового складу.

Abstract

The article examines the process of formation and development of the departmental award system of the Armed Forces of Ukraine in 1996–2014. It reviews the organizational and legal frameworks for establishing incentive awards in the context of reforming Ukraine's security and defense sector and delineating powers between the Ministry of Defense and the General Staff of the Armed Forces of Ukraine. The institutional transformations of 2005, which served as an impetus for introducing proprietary award instruments, are analyzed. It is proven that despite bureaucratic obstacles and regulatory collisions, the award system underwent a significant evolutionary path—from initial incentives to a hierarchically structured system (including the "Glory and Honor" distinction). It became a vital tool for moral stimulation and the strengthening of military traditions, while its historical experience is essential for improving modern approaches to departmental phaleristics, heraldry, and personnel motivation.

Ключові слова: Збройні Сили України, Генеральний штаб, нагородна система, відомчі відзнаки, фалеристика, військова геральдика, мотивація особового складу.

Keywords: Armed Forces of Ukraine, General Staff, award system, departmental distinctions, phaleristics, military heraldry, personnel motivation.

Постановка проблеми.

В умовах масштабного державотворення та реформування сектору безпеки і оборони України особливої актуальності набуває дослідження еволюції відомчих інституцій Збройних Сил (ЗС) України, серед яких чільне місце посідає нагородна система. Будучи важливим елементом воєнної політики, державницької ідентичності та системи морально-психологічного забезпечення військ, вітчизняна нагородна система пройшла складний шлях становлення і трансформації у 1996–2014 рр.

Водночас у науковому дискурсі недостатньо дослідженими залишаються організаційно-правові засади та практичні механізми формування відомчих відзнак не лише Міністерства оборони України, а й Генерального штабу ЗС України як ключового органу військового управління. Потребують системного аналізу й осмислення питання розмежування повноважень суб’єктів щодо заохочення особового складу, трансформація критеріїв нагородження, фалеристичні особливості знаків, а також вплив нормативних колізій і бюрократичних чинників на ефективність функціонування цієї системи в умовах мирного часу.

Виявлення цих закономірностей є необхідним як для теоретичного узагальнення історичного досвіду, так і для вдосконалення сучасних підходів до відомчої нагородної системи, військової геральдики та мотивації особового складу ЗС України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про певну професійну зацікавленість фахівців до окремих аспектів військової символіки та відомчої фалеристики. Зокрема, концептуальні засади розвитку вітчизняної військової символіки розглядалися у праці В. Карпова та Д. Табачника [11].

Питанням становлення та специфіки окремих

відомчих відзнак присвячено низку фахових публікацій О. Муравйова, в яких детально охарактеризовано медаль «Почесний військовий зв'язківець», відзнаку «За заслуги у ліквідації наслідків надзвичайної ситуації» [12], а також почесний нагрудний знак начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України «За заслуги перед Збройними Силами України» [13]. Джерельну базу досліджень доповнюють публікації зображень та описів почесних нагрудних знаків у «Військово-історичному альманасі» [15]. Окремі аспекти запровадження та фалеристичних характеристик почесного нагрудного знака «Слава і честь» досліджено М. Чмирем [19].

Попри наявність цінних праць із військової геральдики та фалеристики, більшість із них мають переважно описовий або джерелознавчий характер, зосереджуючись на зовнішньому оформленні та каталогізації нагород. Водночас системний комплексний аналіз еволюції нагородної системи саме Генерального штабу ЗС України у взаємозв'язку з організаційно-правовими чинниками та потребами військового управління досліджуваного періоду дотепер залишається поза увагою дослідників, що й зумовило актуальність цього наукового пошуку.

Мета статті полягає у комплексному дослідженні еволюції відомчої нагородної системи Збройних Сил України у 1996–2014 роках, її організаційно-правових засад та фалеристичних особливостей.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких *завдань*:

проаналізувати нормативно-правову базу створення відомчих відзнак Міністерства оборони та Генерального штабу ЗС України;

дослідити еволюцію критеріїв заохочення особового складу;

охарактеризувати фалеристичні особливості ключових знаків та відзнак зазначеного періоду;

виявити проблемні чинники та адміністративні колізії, що впливали на ефективність функціонування нагородної системи в умовах мирного часу.

Виклад основного матеріалу.

У процесі формування нагородної системи ЗС України (1996–2014 рр.) ключову роль відігравав Генеральний штаб ЗС України як головний орган військового управління, що здійснює безпосереднє керівництво військами (силами). Поряд із Міноборони України, Генштаб послідовно опікувався питаннями морально-психологічного забезпечення та заохочення особового складу. У межах своєї компетенції він ініціював створення власної системи заохочувальних відзнак, нормативне підґрунтя якої почало активно формуватися у 2005 р.

Інституційні перетворення 2005 р. стали потужним імпульсом для чіткішого розмежування функцій між Міністерством оборони України та Генеральним штабом ЗС України, а також введення посади Головнокомандувача ЗС України, виконання обов'язків якого покладалося на начальника Генерального штабу ЗС України (першим цю посаду обійняв генерал-полковник Сергій Кириченко). Це сприяло імплементації власних нагородних інструментів безпосередньо в системі Генерального штабу [17].

Важливим етапом стало видання наказу Міністерства оборони України від 5 липня 2005 р. № 375, яким було офіційно запроваджено почесні нагрудні знаки начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України [1, арк. 23-38].

Згідно із затвердженим Положенням, начальник Генерального штабу – Головнокомандувач ЗС України отримав повноваження заохочувати почесними знаками військовослужбовців і працівників ЗС України за зразкове виконання військового (службового) обов'язку, високі досягнення у повсякденній службовій діяльності, а також за плідну співпрацю із Збройними Силами та інші заслуги. Зазначені відзнаки встановлювалися наказами начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України та мали форму медалей або нагрудних знаків.

Протягом 2005–2006 рр. основу системи почесних нагрудних знаків начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України становили такі відзнаки:

"За самовіддану працю у Збройних Силах України" [2, арк. 149-150].

"За взірцевість у військовій службі" (I, II та III ступені) [4, арк. 151-153];

"За доблесну військову службу Батьківщині" [5, арк. 154-155];

"За досягнення у військовій службі" (I та II ступені) [6, арк. 156-158];

Почесний нагрудний знак "*За самовіддану працю у Збройних Силах України*" виготовлявся з жовтого металу і має форму кола. У центрі лицьового боку знака на тлі променів, що розходяться, розміщено фігурний щит із зображенням прямого хреста із розбіжними кінцями. У центрі хреста на круглому медальйоні розміщено Знак Княжої Держави Володимира Великого. Сторони хреста покрито емаллю малинового кольору, а медальйон – емаллю синього кольору. По колу розміщено вінок з лаврової і дубової гілок. На зворотному боці – напис у три рядки: "За самовіддану працю". Стрічка нагрудного знака – шовкова муарова малинового кольору з однією жовтою і двома синіми поздовжніми смужками посередині.

Почесний нагрудний знак "*За взірцевість у військовій службі*" I ступеня виготовлявся з жовтого металу і має форму кола. На лицьовому боці знака зображено композицію у вигляді літака, корабля, танка та антени радіолокаційної станції, що охоплює більшість основних спеціальносте видів ЗС України. Вище розміщено емблему ЗС України, а з правого боку композиції – лаврову гілку. На зворотному боці міститься напис у чотири рядки: "За взірцевість у військовій службі".

Нагрудний знак II ступеня виготовлявся з білого металу і є ідентичним знаку I ступеня; знак III ступеня виконувався з бронзи і має аналогічне оформлення.

Стрічка нагрудного знака – шовкова муарова

синього кольору з поздовжніми малиновими і жовтими смужками: для I ступеня – жовта смужка посередині, по обидві сторони якої дві малинові смужки; для II ступеня – малинова смужка 3 мм завширшки посередині, по обидві сторони якої дві жовті й дві малинові смужки; для III ступеня – з трьома жовтими і чотирма малиновими смужками.

Відзнака "*За доблесну військову службу Батьківщині*" має вигляд лаврового вінка з білого металу, перевитого у нижній частині стрічкою, на який накладено прямий рівносторонній хрест із розбіжними кінцями. На хресті розміщено стилізовані зображення двох крил, якоря та схрещених мечів вістрям угору (символізує види ЗС України). У центрі хреста на круглому медальйоні розміщено Знак Княжої Держави Володимира Великого. Сторони хреста покрито емаллю малинового кольору, медальйон – емаллю синього кольору. Медальйон має два пружки, між якими на білому емалевому тлі міститься напис: "За доблесну військову службу Батьківщині". Зображення крил, якоря, схрещених мечів та медальйону виконано із жовтого металу [11, с. 162].

Нагрудний знак з допомогою вушка з кільцем з'єднується з прямокутною колодкою, обтягнутою шовковою муаровою стрічкою малинового кольору, по краях якої розташовані дві жовті й одна синя смужки.

Почесний нагрудний знак "*За досягнення у військовій службі*" I ступеня має форму кола та виготовлявся з жовтого металу. На лицьовому боці знака у центрі розмішено емблему Генерального штабу ЗС України (сторони хреста емблеми покрито емаллю малинового кольору, а медальйон – емаллю синього кольору). Центральне зображення оточене написом "За досягнення у військовій службі" та двома лавровими гілочками [15, с. 3 обкл.].

Нагрудний знак II ступеня має ідентичну форму, проте виготовляється з білого металу. На емблемі Генерального штабу ЗС України зображення Знака Княжої Держави Володимира Великого, крил, якоря, мечів, пружків, хреста і медальйона виготовлені із жовтого металу.

Стрічка нагрудного знака – шовкова муарова малинового кольору з поздовжніми синіми і жовтими смужками посередині: для I ступеня – з однією синьою та двома жовтими смужками, а для II ступеня – з двома синіми і однією жовтою смужкою.

Почесними нагрудними знаками начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України нагороджувалися військовослужбовці та працівники ЗС України відповідно до таких вимог і заслуг:

"*За самовіддану працю у Збройних Силах України*" – нагороджуються працівники ЗС України за старанність і сумлінне виконання службових обов'язків. У трудовій книжці особи, відзначеної цим знаком, робиться відповідний запис із зазначенням номера і дати наказу [2];

"*За взірцевість у військовій службі*" – нагороджуються особи рядового, сержантського і старшинського складу ЗС України за високі показники у бойовій підготовці, під час несення бойового чергування, вартової (внутрішньої) служби та у повсякденній діяльності [4];

"*За доблесну військову службу Батьківщині*" – нагороджуються особи офіцерського складу ЗС України за зразкове виконання військового обов'язку, самовідданість і стійкість, виявлені при проходженні військової служби [5];

"*За досягнення у військовій службі*" – нагороджуються військовослужбовці ЗС України: I ступеня – за високі показники протягом двох і більше навчальних років; II ступеня – за високі показники протягом одного навчального року. Нагородження цим знаком здійснювалося, як правило, один раз на рік до Дня Збройних Сил України [6].

Усі вищезгадані почесні нагрудні знаки та відповідні положення до них були встановлені наказами начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України:

"За самовіддану працю у Збройних Силах України" – від 31.08.2005 р. № 128 [2];

"За взірцевість у військовій службі" – від 24.07.2006 р. № 135 [4];

"За доблесну військову службу Батьківщині" – від 24.07.2006 р. № 136 [5];

"За досягнення у військовій службі" – від 24 липня 2006 р. № 137 [6].

Відповідно до Указу Президента України від 1 лютого 2000 р. № 154 "Про День військ зв'язку" в державі було встановлено свято – День військ зв'язку, яке щороку визначалося 8 серпня [16].

На виконання цього Указу, задля підтвердження правонаступництва фалеристичних і військових традицій та з метою відзначення воїнів-зв'язківців, керівництво тогочасного Головного управління зв'язку та інформаційних систем Генерального штабу ЗС України спільно із відділом військової символіки та геральдики Генштабу ЗС України здійснили розроблення ескізної документації та положення до відзнаки "Почесний зв'язківець".

Оскільки право на встановлення почесних відзнак належало виняткова Міністерству оборони України або Генеральному штабу ЗС України, вирішено було звернутися з цією ініціативою до тогочасного начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України генерала армії України Сергія Кириченка. Очільник Генерального штабу задовольнив клопотання Головного управління зв'язку та інформаційних систем, проте назву почесної відзнаки було дещо від кореговано – на "*Почесний військовий зв'язківець*" [12, с. 122].

Відзнаку "*Почесний військовий зв'язківець*" було встановлено у 2008 р. наказом начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України від 29 липня 2008 р. № 79. Нею нагороджували військовослужбовців та працівників ЗС України за вагомий внесок у розвиток системи і військ зв'язку, зразкове виконання військового обов'язку, старанність та сумлінне виконання службових обов'язків [7].

Відзнака "Почесний військовий зв'язківець" являє собою прямий рівносторонній хрест із жовтого

металу розміром 40 мм із розбіжними сторонами, покритими малиновою емаллю, поміж якими розходяться промені білого металу. Своєю формою він нагадує хрест, покладений в основу емблеми Збройних Сил України. Посередині хреста розташований круглий медальйон, покритий синьою емаллю із зображенням стилізованих сигнального ріжка й крила жовтого кольору – одвічного символу поштового зв'язку. На задньому плані розташовано зображення Земної кулі з материками жовтого металу, вкритими блакитною емаллю. Земну кулю увінчує антенна щогла жовтого металу, від якої розходяться шість стилізованих блискавок. Крило, ріжок і радіощогла уособлюють етапи розвитку засобів зв'язку – від голубиної пошти до радіо. Довкола медальйону на тлі жовтого металу містяться написи: "ПОЧЕСНИЙ" (у верхній частині) та "ВІЙСЬКОВИЙ ЗВ'ЯЗКІВЕЦЬ" (у нижній частині). Стрічка нагрудного знака поєднує в собі кольори прапора Збройних Сил України (малиновий, синій, жовтий) і чорний колір – колір технічних військ, який традиційно пов'язують із військами зв'язку [12, с. 122-124].

Вперше відзнакою "Почесний військовий зв'язківець" нагороджено під час урочистих зборів із нагоди Дня військ зв'язку. Серед перших, хто отримав цю відзнаку, були колишній начальник кафедри автоматизованих систем керування військами і зв'язку Академії Збройних Сил України генерал-майор запасу В. Бочкарьов, а також колишні начальники військ зв'язку генерал-лейтенанти запасу В. Іщук та В. Самійленко [12, с. 124].

Наступною нагородою в загальній системі відзнак начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України стала медаль "*За заслуги у ліквідації наслідків надзвичайної ситуації*". Під час техногенних чи природніх катастроф на допомогу рятівникам та цивільним завжди приходять військовослужбовці Збройних Сил України. Улітку 2008 р. Україну накрила потужна серія повнів у ліквідації наслідків яких військовослужбовці ЗС України взяли найактивнішу участь.

З метою відзначення заслуг учасників ліквідації стихійного лиха керівництво Генерального штабу ЗС України своїм окремим дорученням від 9 серпня 2008 р. визначило завдання розробити пропозиції щодо заснування відповідної відзнаки та доповісти їх начальникові Генерального штабу – Головнокомандувачу ЗС України. Відділом військової символіки та геральдики Генштабу ЗС України було запропоновано два варіанти нагрудних знаків: "За заслуги у ліквідації наслідків надзвичайної ситуації" та "За самовідданість у надзвичайній ситуації". Схвалено було перший варіант [12, с.125].

Почесний нагрудний знак "За заслуги у ліквідації наслідків надзвичайної ситуації" було встановлено наказом начальника Генерального штабу – Головнокомандувачу ЗС України від 22 жовтня 2008 р. № 111. Ним нагороджували військовослужбовців та працівників Збройних Сил України за зразкове виконання завдань, пов'язаних із ліквідацією наслідків стихійних лих, природних та техногенних катастроф, інших надзвичайних ситуацій, і виявлені при цьому стійкість та самовідданість [3].

Відзнака має правильну круглу форму з жовтого металу діаметром 32 мм. На аверсі зображено емблему ЗС України та дубову гілку (символ мужності), перевиті фігурною стрічкою з двох рівновеликих смужок. На реверсі – композиція з чотирьох рук, з'єднаних між собою у спосіб перенесення потерпілих "замок". По колу нанесено написи, що відображають назву нагрудного знака. Стрічка медалі поєднує малиновий, блакитний, помаранчевий і білий кольори: малиновий уособлює Збройні Сили; помаранчевий і блакитний – кольори міжнародного знака цивільної оборони (блакитний трикутник на помаранчевому полі); білий символізує самовідданість, яку виявляють військовослужбовців ЗС України долаючи наслідки стихійного лиха.

На початку 2009 р. постало питання щодо запровадження найвищої нагороди начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України, яка за статусом та способом кріплення прирівнювалася б до аналогічної відзнаки Міністерства оборони України "Доблесть і честь". Розроблення зовнішнього вигляду було покладено на Відділ військової символіки та геральдики Генерального штабу ЗС України. Робоча назва відзнаки спочатку звучала як "За військову доблесть", пізніше її змінили на "*Слава і честь*" [19, с. 103].

Основу нагрудного знака складала шестипроменева зірка з двогранними променями, проміжки між якими мали покриватися малиновою емаллю. У центрі розміщувався круглий медальйон із зображенням емблеми ЗС України на синьому фоні та написами по колу: "ГЕНЕРАЛЬНИЙ ШТАБ" (зверху) і "ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАТНИ" (знизу). Паралельно з ескізами відзнаки опрацьовувалися тривимірні комп'ютерні моделі з подальшим виготовленням макетів зі спеціального модельного воску на трикоординатному плотері. Під час роботи емблему ЗС України замінили на емблему Генерального штабу ЗС України, що більше відповідало статусу нагороди, а напис по колу змінили на "СЛАВА і ЧЕСТЬ" (зверху) та додали лаврові вінки (знизу) [19, с. 104].

Крім зазначеного, було розроблено альтернативний варіант малюнка почесного нагрудного знака, який мав вигляд зірки з чотирьох пучків розбіжних променів, У її центрі розташовувався круглий давньоруський щит з накладеним на нього мечем вістрям угору, що проходив крізь лавровий вінок. Між пучками променів містилося зображення нарукавних знаків розрізнення посади Наказного Отамана Головної Управи Війська Української Народної Республіки (ГУВ УНР) від 24 квітня 1919 р. ч. 276 (шеврон із трьома петлями й Тризуб). Посаду Наказного Отамана Армії УНР було встановлено законом, ухваленим Радою Народних Міністрів УНР від 20 лютого 1919 р. Відповідно до цього закону Наказному Отаманові доручалося "безпосереднє ведення військових операцій", йому підпорядковувалися "всі галузі дієвої армії во всіх відношеннях". Наказний Отаман підпорядковувався через Головного Отамана лише Директорій УНР і

відповідав перед нею. Ця посада стала історичним аналогом посаді Головнокомандувача ЗС України [18, арк. 142; 19, с. 103-107].

На етапі затвердження почесного нагрудного знака начальник Генерального штабу – Головнокомандувач ЗС України генерал армії України Сергій Кириченко зупинив свій вибір на варіанті у вигляді шестипроменевої зірки. Почесний нагрудний знак "Слава і честь" було встановлено наказом начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України 20 жовтня 2009 р. № 111 [8].

Відзнака має вигляд шестипроменевої зірки з розбіжними двогранними променями білого металу. Між великими променями зірки є коротші жовті промені, середина яких покрита червоною емаллю. Посередині зірки встановлено круглий медальйон жовтого металу з розміщенням на синьому фоні емблеми Генерального штабу ЗС України, що вказує на належність нагороди. Довкола медальйона розміщено напис "СЛАВА І ЧЕСТЬ" та зображення двох схрещених лаврових гілок, що символізують військову славу.

Стрічка нагрудного знака, що використовується на планочці, поєднує білий колір (символізує самовідданість) та основні кольори прапорів видів ЗС України: малиновий (Сухопутні війська), блакитний і жовтий (Повітряні Сили), білий та синій (Військово-Морські Сили). Відрізок стрічки для виготовлення планки вперше в нагородній практиці військового відомства вручався нагородженому разом із знаком та посвідченням. Також передбачалося розміщення на планочці металевої емблеми ЗС України посередині білої смуги, проте згодом від неї відмовилися.

Відповідно до Положення, нагрудним знаком нагороджуються особи старшого та вищого офіцерського складу ЗС України за визначний особистий внесок у справу розбудови і розвитку ЗС України, підтримання високої бойової та мобілізаційної готовності військ (сил), зміцнення обороноздатності та безпеки держави. За умовами подання до нагородження згадані особи вже повинні мати інші почесні нагрудні знаки начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України.

Нагородження здійснюється за особистим рішенням начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України з нагоди державних, професійних свят, особистих ювілеїв, а також при звільненні з військової служби.

Як і було за задумом, порядок носіння нагрудного знака передбачав його розміщення з правого боку грудей – після заохочувальних відзнак Міністерства оборони України.

Перші вручення почесного нагрудного знака "Слава і честь" відбулися 18 листопада 2009 р. з нагоди Дня Генерального штабу ЗС України. Високої нагороди були удостоєні начальник Генерального штабу – Головнокомандувач ЗС України у 2004–2009 рр. генерал армії України Сергій Кириченко і перший заступник начальника Генерального штабу ЗС України у 2006–2009 рр. генерал-полковник Генадій Воробйов [19, с. 105].

На вручених їм знаках поверхня променів зірки була нікельованою, тоді як під час подальшого виробництва зірку стали тонувати під старе срібло. Станом на середину травня 2014 р., за підрахунками автора, кількість нагороджених почесним нагрудним знаком "Слава і честь" становила близько 57 осіб.

Наступною нагородою, яка призначалася для нагородження осіб, які не є військовослужбовцями, але мають певні заслуги перед Збройними Силами став почесний нагрудний знак начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України "За заслуги перед Збройними Силами України".

Почесний нагрудний знак "*За заслуги перед Збройними Силами України*" виготовляється із жовтого металу і має вигляд хреста з вісьмома розбіжними променями, покритими напівпрозорою малиновою емаллю, між якими розміщені пучки з трьох променів білого металу. Посередині хреста міститься круглий медальйон із жовтого металу із зображенням емблеми ЗС України, який оточений віночком із лаврового листя – символ військової слави. Сторони хреста емблеми ЗС України покриті малиновою емаллю, а медальйон – синьою. Вінок перевитий у чотирьох місцях стрічкою, на якій розташовані літери "З", "С", "У" (абревіатура назви "Збройні Сили України") та цифри "1991", що відображають рік створення сучасного українського війська. На зворотному боці нагрудного знака вибито напис у чотири рядки: "ЗА ЗАСЛУГИ ПЕРЕД ЗС УКРАЇНИ" та вигравіруваний порядковий номер. Стрічка нагрудного знака – малинова з трьома жовтими смужками, які символізують три види Збройних Сил.

Відповідно до Положення, цим знаком нагороджуються військовослужбовці, працівники ЗС України та громадяни України за значний особистий внесок у справу розбудови і розвитку Збройних Сил, зміцнення співробітництва у військовій, науковій, соціальній, культурній та інших сферах життєдіяльності ЗС України. Нагородження здійснюється з нагоди державних і професійних свят, особистих ювілеїв, при звільненні з військової служби, а також в інших випадках за рішенням начальника Генерального штабу – Голонокомандувача ЗС України. Нагрудний знак носять на лівому боці грудей – після почесного нагрудного знака начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України "За доблесну військову службу Батьківщині" [13, с. 132-136].

Крім зазначених нагород і відзнак, як різновид заохочення в нагородній системі ЗС України було передбачено *Грамоту* та *Подяку*.

В умовах мирного часу кількість нагород та вичерпний їх перелік давали змогу повною мірою охопити весь спектр діяльності ЗС України: високі показники в бойовій підготовці, розвиток співробітництва у військовій сфері, зразкове виконання військового обов'язку тощо. Відповідно перелік досягнень та вчинків знайшов відображення і в положеннях про нагороди:

за вагомий внесок у справу розвитку співробітництва у військовій сфері, підтримання миру та дружніх відносин між збройними силами держав;

за внесок у справу зміцнення обороноздатності

держави, підтримання високої бойової готовності військ (сил);

за зразкове виконання військового обов'язку, підтримання високої бойової готовності військ (сил), високу професійну майстерність, виявлену під час навчань, бойового чергування, інспекційних (контрольних) перевірок, а також за самовідданість і стійкість, виявлені під час проходження військової служби (якщо за підсумками навчального року діяльність військовослужбовця оцінено на "відмінно");

за значний особистий внесок у справу розбудови, розвитку та забезпечення життєдіяльності ЗС України, досягнення високих показників у військовій, науковій, освітянській та інших сферах діяльності, бездоганну сумлінну службу (працю) та видатні заслуги перед ЗС України;

за значний особистий внесок у справу розвитку Збройних Сил України, плідну співпрацю з Міністерством оборони України та інші видатні заслуги перед ЗС України [19].

Таким чином, система почесних нагрудних знаків начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України за кількістю знаків наблизилася до системи заохочувальних відзнак Міністерства оборони України. У випадку з окремими почесними нагрудними знаками можна навіть говорити про дублювання ними деяких заохочувальних відзнак. Так, Положення про почесний нагрудний знак "За взірцевість у військовій службі" нагадує Положення про медаль Міністерства оборони України "За особисті досягнення"; а нагрудний знак "За доблесну військову службу Батьківщині" за окремими пунктами свого Положення подібний до нагрудного знака Міністерства оборони України "Доблесть і честь".

Нагородна система Генерального штабу ЗС України була універсальною у своєму прагненні охопити нагородами всі категорії військовослужбовців – від рядового складу до офіцерів і працівників ЗС України.

Загалом нагородна система начальника Генерального штабу – Головнокомандувача ЗС України налічувала 7 відзнак:

"Слава і честь";

"За доблесну військову службу Батьківщині";

"За заслуги перед Збройними Силами України";

"За досягнення у військовій службі" (I та II ступенів);

"За заслуги у ліквідації наслідків надзвичайної ситуації";

"За взірцевість у військовій службі" (I, II та II ступенів);

"За самовіддану працю у Збройних Силах України".

Серед них два зразки мали ступені: "За досягнення у військовій службі" (I та II ступенів) – для нагородження осіб офіцерського складу та "За взірцевість у військовій службі" (I, II та II ступенів) – для відзначення осіб рядового та сержантського і старшинського складу.

Крім цього, до відзнак начальника Генерального штабу ЗС України належать пам'ятні нагрудні знаки:

"*Почесний військовий зв'язківець*" (наказ начальника Генштабу – Головнокомандувача ЗС України від 29 липня 2008 р. № 79 (зі змінами від 1 вересня 2011 р. № 164 [7]);

"*Учасник військових навчань*" (наказ начальника Генштабу – Головнокомандувача ЗС України від 12 травня 2011 р. № 87 [10]);

"*Кращий сержант (старшина) Збройних Сил України*" (наказ начальника Генштабу – Головнокомандувача ЗС України від 17 жовтня 2011 р. № 196 [9]).

У 2015 р. вертикаль нагород начальника Генерального штабу ЗС України поповнилася справжньою бойовою відзнакою – нагрудним знаком "Учасник АТО" (наказ Генерального штабу ЗС України від 20 березня 2015 р. № 104 [14]), яким нагороджувалися військовослужбовці за безпосередню участь в антитерористичній операції на території Донецької та Луганської областей.

Таким чином, до 2014 р. нагородна система ЗС України (з урахуванням ступенів відомчих відзнак Міністерства оборони України та Генерального штабу ЗС України) налічувала:

Міністерство оборони України – 18 нагород;

Генеральний штабу ЗС України – 9 нагород та 4 пам'ятні знаки.

Підсумовуючи зазначене вище можемо дійти таких **висновків**.

Загальна кількість та номенклатура відомчих відзнак потенційно могли повністю задовольнити потреби ЗС України щодо ефективного заохочення особового складу – військовослужбовців та працівників ЗС України – за зразкове виконання військового обов'язку, підтримання високої бойової готовності військ (сил), високу професійну майстерність, виявлену під час навчань і бойового чергування, інспекційних (контрольних) перевірок, самовідданість і стійкість, виявлені під час проходження військової служби, а також які за підсумками навчального року оцінені на "відмінно" тощо.

Проте на практиці потенціал цієї системи суттєво стримувався низкою бюрократичних перепон, складністю процедур погодження та нормативними колізіями між Міністерством оборони України і Генеральним штабом ЗС України. Попри ці виклики, нагородна система Збройних Сил України у 1996–2014 рр. пройшла значний еволюційний шлях: від зародження первинних відомчих заохочень до створення розгалуженої, ієрархічно вибудуваної системи нагород і пам'ятних знаків (включно з найвищою відзнакою "Слава і честь" та спеціалізованими бойовими відзнаками). Вона стала важливим інструментом морального стимулювання військовослужбовців, зміцнення військових традицій та відображення реальних етапів розвитку й державотворення українського вітчизняного війська перед викликами новітньої історії.

References

1. Галузевий державний архів Міністерства оборони (ГДА МО) України, ф. 3697 (Наказовий відділ МО України), оп. 55199, спр. 21, арк. 23-38.

Наказ Міністра оборони України від 5 липня 2005 р. № 375 “Про встановлення Почесних нагрудних знаків начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України”.

2. ГДА МО України, ф. 3697 (Наказовий відділ МО України), оп. 55457, спр. 20, арк. 149–150. Наказ начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України від 31 серпня 2005 р. № 128 “Про затвердження Почесного нагрудного знака “За самовіддану працю у Збройних Силах України”.

3. ГДА МО України, ф. 3697 (Наказовий відділ МОУ), оп. 55457, спр. 20, арк. 180–187. Наказ начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України від 22 жовтня 2008 р. № 111 “Про встановлення Почесного нагрудного знака “За заслуги у ліквідації наслідків надзвичайної ситуації”.

4. ГДА МО України, ф. 3697 (Наказовий відділ МОУ), оп. 55457, спр. 20, арк. 151–153. Наказ начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України від 24 липня 2006 р. № 135 “Про затвердження Почесного нагрудного знака “За взірцевість у військовій службі”.

5. ГДА МО України, ф. 3697 (Наказовий відділ МОУ), оп. 55457, спр. 20, арк. 154-155. Наказ начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України від 24 липня 2006 р. № 136 “Про затвердження Почесного нагрудного знака “За доблесну військову службу Батьківщині”.

6. ГДА МО України, ф. 3697 (Наказовий відділ МОУ), оп. 55457, спр. 20, арк. 156–158. Наказ начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України від 24 липня 2006 р. № 137 “Про встановлення Почесного нагрудного знака “За досягнення у військовій службі”.

7. ГДА МО України, ф. 3697 (Наказовий відділ МОУ), оп. 55457, спр. 20, арк. 159–160. Наказ начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України від 29 липня 2008 р. № 79 “Про встановлення Почесного нагрудного знака “Почесний військовий зв’язківець”.

8. ГДА МО України, ф. 3697 (Наказовий відділ МОУ), оп. 55457, спр. 20, арк. 213–215. Наказ начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України від 20 жовтня 2009 р. № 111 “Про встановлення Почесного нагрудного знака “Слава і Честь”.

9. ГДА МО України, ф. 3697 (Наказовий відділ МОУ), оп. 55457, спр. 22, арк. 46–51. Наказ начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України від 17 жовтня 2011 р. № 196 “Про встановлення Почесного нагрудного знака “Кращий сержант (старшина) Збройних Сил України”.

10. ГДА МО України, ф. 3697 (Наказовий відділ МОУ), оп. 55457, спр. 22, арк. 34–37. Наказ начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України від 12 травня 2011 р. № 87 “Про встановлення Почесного нагрудного знака “Учасник військових навчань”.

11. Карпов В., Табачник Д. Військова символіка держави. Київ: Либідь, 2007. 296 с.; іл.

12. Муравйов О. Медаль “Почесний військовий зв’язківець” та “За заслуги у ліквідації наслідків надзвичайної ситуації”. *Військово-історичний альманах*. 2008. Ч. 2 (17). С. 120–125.

13. Муравйов О. Медаль Почесний нагрудний знак начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України “За заслуги перед Збройними Силами України”. *Військово-історичний альманах*. 2011. Ч. 1 (22). С. 132–136.

14. Наказ начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України від 20 березня 2015 р. № 104 “Про встановлення Почесного нагрудного знака “Учасник АТО”. URL: https://www.facebook.com/GeneralStaff.ua/posts/

15. Почесні нагрудні знаки начальника Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України. Фото нагород. *Військово-історичний альманах*. 2007. Ч. 1 (14). С. 3 обкл.

16. Указ Президента України від 1 лютого 2000 р. № 154 “Про День військ зв’язку”. *Урядовий кур’єр*. 2000. 8 лютого. № 1283.

17. Указ Президента України від 16 червня 2005 р. № 961/2005 “Про призначення С. Кириченка начальником Генерального штабу – Головнокомандувачем Збройних Сил України”. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/961/2005#Text

18. Центральний державний архів вищих органів влади та управління (ЦДАВОВ) України, ф. 1075, пп. 2, спр. 5, арк. 142. Посаду Наказного Отамана було скасовано законом від 19 липня 1919 р. (оголошений наказом ГУВ УНР від 22 липня1919 р. ч. 82). Командування Армією УНР і виконання обов’язків Командувача армією прийняв на себе Головний Отаман війська УНР на правах Верховного Головнокомандуючого.

19. Чмир М. Почесний нагрудний знак “Слава і честь”. *Цитаделя*: Львівський мілітарний альманах. Львів. Астролябія. 2010. № 1. С. 103-107.

JURIDICAL SCIENCES

ДЕЯКІ ПИТАННЯ КРИМІНОЛОГІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСОБЛИВО ТЯЖКИХ КРИМІНАЛЬНИХ ПРАВОПОРУШЕНЬ ПРОТИ ЖИТТЯ ТА ЗДОРОВ'Я

Пархета В.І.
доктор філософії зі спеціальності D8 «Право»,
доцент кафедри правових дисциплін
Уманського національного університету
ORCID: 0000-0003-2774-4790

SOME ISSUES OF CRIMINOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ESPECIALLY GRAVE CRIMINAL OFFENCES AGAINST LIFE AND HEALTH

Parkheta V.
Ph.D. in Law,
Associate Professor of the Department of Legal Disciplines,
Uman National University
ORCID: 0000-0003-2774-4790
DOI: 10.5281/zenodo.22091577

Анотація

У статті здійснено кримінологічний аналіз стану, динаміки та структури тяжких і особливо тяжких насильницьких злочинів проти життя та здоров'я особи в Україні. Висвітлено ключові детермінанти насильницької злочинності, серед яких особливу роль відіграють ситуативні чинники, сімейно-побутові конфлікти, віктимна поведінка потерпілих. Проаналізовано статистичні дані щодо реєстрації правопорушень у цій сфері та притягнення винних осіб до відповідальності. Сформовано певні риси кримінологічний портрет насильницького злочинця.

На основі проведеного дослідження обґрунтовано необхідність реформування системи кримінальної статистики шляхом прийняття відповідного нормативно-правового акта, а також акцентовано на пріоритетності превентивних та профілактичних заходів у системі протидії кримінальному насильству.

Abstract

The article provides a criminological analysis of the state, dynamics, and structure of grave and especially grave violent crimes against the life and health of an individual in Ukraine. It highlights the key determinative factors of violent crime, among which situational factors, domestic and family conflicts, and the victim behavior of victims play a particularly prominent role. Statistical data regarding the registration of offenses in this field and the prosecution of perpetrators are analyzed. Certain traits of the criminological profile of a violent offender have been formulated.

Based on the conducted research, the necessity of reforming the criminal statistics system through the adoption of an appropriate legal act is substantiated, and emphasis is placed on the priority of preventive and proactive measures within the system for combating criminal violence.

Ключові слова: злочинність, насильницькі кримінальні правопорушення, вбивство, тяжкі тілесні ушкодження, кримінологічна характеристика.

Keywords: crime, violent crimes, homicide, grievous bodily harm, criminological characteristics.

Організація й проведення належної роботи із попередження та протидії тяжким прпавопорушенням проти життя та здоров'я особи багато в чому базується на аналізі стану кількісно-якісних показників таких злочинних проявів, з'ясуванні особливостей останніх, прогнозуванні основних тенденцій їх розвитку, встановленні й розумінні особливостей зумовлювання цих злочинів, дослідження особи насильницького злочинця та інше. В науковій літературі останніх років велику увагу дослідженню тяжкої насильницької злочинності проти життя та здоров'я особи у масштабах всієї країни приділено в роботах таких вітчизняних і зарубіжних учених, як: Бородін, В.В. Голіна, Б.М. Головкін, М.М. Гітінова А.І. Долгова, І.М. Даньшин, В.Є. Ємінов, О.М. Костенко, В.М. Кудрявцев, Н.Ф. Кузнєцова, С.Ю. та інших дослідників.

Забезпечення безпеки громадян, охорона їх життя та здоров'я, особистої недоторканності є одним з центральних напрямів соціальної політики України. Планомірній розбудові будь-якої правової держави суттєво заважають погіршення криміногенної ситуації, підвищення рівня злочинності, негативні зміни її кількісних та якісних показників. У сучасних умовах, коли усі усвідомлюють обсяги нелегального озброєння на території нашої держави, найбільшу тривогу викликає тенденція до поширення насильницьких кримінальних правопорушень проти життя і здоров'я[6, с.289].

Відповідно до ст. 1 Завданнями Кримінального кодексу України є охорона прав і свобод людини і громадянина, власності, громадського порядку та громадської безпеки, довкілля, конституційного устрою України від злочинних посягань, а також запобігання кримінальним правопорушенням. Таким

чином, законодавцем визнаний пріоритет охорони найбільш цінного об'єкта кримінально-правової охорони – людини.

Проблема насильства гостро постає у сучасному українському суспільстві. Насильницька злочинність являє собою не тільки сукупність насильницьких кримінальних правопорушень, а й становить загрозу національній безпеці держави, конституційним правам громадян, нормальному розвитку правової демократичної держави в цілому.

У широкому розумінні під насильницькими правопорушеннями, як правило, розуміють передбачені кримінальним законом умисні фізичні дії, що завдають фізичної шкоди особі, а також погрози нанесення тієї чи іншої шкоди, примусовий вплив на людину, її пригноблення, порушення особистої недоторканності. У вузькому розумінні під насильницькими злочинами проти особи розуміють нелегітимні, заборонені кримінальним законом діяння, що посягають на життя, здоров'я, фізичну (у т. ч. статеву) недоторканність особи [9 с.139-140].

Отже, кримінальне насильство: а) може застосовуватися лише до фізичних осіб проти їх волі; б) вчинятися у формі активної дії; в) скоюватися осудними особами; г) дії суб'єкта кримінального насильства характеризуються прямим умислом; д) обов'язковою ознакою є наявність мети, а саме спричинення фізичних, психічних страждань чи смерті особі чи групі осіб.

Аналізуючи структуру злочинності країни, доходимо висновку, що частка насильницьких злочинів становить 8-9% від загальної кількості скоюваних кримінальних правопорушень. Цей масив складають: умисні вбивства; умисні тяжкі тілесні ушкодження; домашнє насильство, катування, побої та мордування, доведення до самогубства та інші.

Так, за 6 місяців поточного року зареєстровано 297371 кримінальних правопорушень, з них проти життя та здоров'я особи 45192, умисні вбивства 31363, тяжкі тілесні ушкодження 583, домашнє насильство 842. До кримінальної відповідальності за вчинення такої категорії злочинів притягнено 8860 осіб (з них: вбивство 377 осіб, умисне тяжке тілесне ушкодження 585 осіб (у т.ч. що спричинило смерть потерпілого 119 осіб). За аналогічний період 2025 року зареєстровано 327847 кримінальних правопорушень, з них проти життя та здоров'я 42426, умисні вбивства 27900, тяжкі тілесні ушкодження 658, домашнє насильство 1252, до кримінальної відповідальності притягнено 48598 осіб, (вбивство 432, тяжкі тілесні ушкодження 662 (у т.ч. що спричинило смерть потерпілого 165) [4, 5].

Зниження показника найбільш тяжкого насильницького злочину переважно зумовлено зменшенням кількості молоді у структурі населення України. Збільшення показників умисних убивств безумовно також пов'язане з військовою збройною агресією Росії проти України та значною кількістю загиблих у ході бойових дій. [10, с.189]. У 2026 році фіксується зменшення вчинених кримінальних правопорушень, зокрема тяжких та особливо тяжких; однак, при цьому зросла кількість інших злочинів, зокрема шахрайств, злочинів у сфері використання електронно-обчислюваних машин, систем та комп'ютерних мереж і мереж електрозв'язку (до яких належить і кіберзлочинність).

Попри те, що статистичні показники стану злочинності свідчать про зменшення кількості кримінальних правопорушень насильницької спрямованості, Україна нажаль зберігає високі позиції у рейтингу країн з рівнем злочинності у Європі, про що свідчать данні сервісу Numbeo. Так, рейтинг України складає 46,91, для порівняння Німеччини -39, 05, Румунії – 33,13, Польщі – 28,68 [11].

Зазначимо, що станом на липень 2026 року Україна займає 68 місце за найвищім рівнем злочинності серед країн світу. Трохи вище за списком – Замбія та Марокко, тож показники не втішні.

Крім того, причинами зниження рівня особливо тяжких кримінальних правопорешнь проти життя та здоров'я є латентність. Саме латентністю пояснюється такий феномен – як зростання кількості злочинів при постійному зниженні показників офіційної статистики.

Латентність насильницьких злочинів проти особи, викликана різним рядом причин: приховуванням злочинів (11-15 %), неправильною кваліфікацією (24-37 %), природною латентністю (неповідомленнями жертв про вчинені посягання – 47-75 %, ретельне приховування трупів після умисних вбивств, що розкриваються через 3-8 років – 24 %, оцінка ймовірних умисних вбивств з приховуванням трупів як безвісти зниклих осіб – 26 %) [9 ст.170]. Серед причин латентності також апатія і зневіра громадян, які не повідомляють про кримінальні правопорушення через низький рівень довіри до правоохоронців.

Крім того, надзвичайно високу латентність мають злочини, що вчиняються на тимчасово окупованих територіях, їх облік якщо й ведеться, то показники далекі від реальних. Злочинність на непідконтрольній території фактично залишається безкарною. Більше того, винувата особа має можливість уникнути правосуддя шляхом переховування на окупованих територіях.

Друга причина такої розбіжності у цифрах пояснюється і намаганням нинішнього керівництва правоохоронних органів штучно понижувати рівень злочинності, ухилятись від реєстрації злочинів, кваліфікувати діяння за іншими статтями Кримінального кодексу, особливо якщо вони вчинені в умовах неочевидності.

У цьому зв'язку кримінологічну політику держави та діяльність правоохоронних органів у сфері протидії кримінальному насильству й злочинності загалом навряд чи можна визнати задовільною. Більше того, звертає на себе увагу значна різниця в абсолютних і відносних показниках, що відображають практику реалізації правоохоронними органами принципу невідворотності покарання, а також виявлення і притягнення осіб до відповідальності[1 с.119]. Так, з 31363 злочинів кваліфікованих за ч. 1 ст. 115 КК України, повідомлення про підо-

зру вручене у 364 провадженнях, а до суду з обвинувальним актом направлено лише 165 проваджень. Аналогічна ситуація із злочинами кваліфікованими за ст. 121 КК України з 583 –до суду з обвинувальним актом направлено 319 проваджень.

Якщо повернутися до питань статистики кримінальних правопорушень, то побачимо, що облік злочинів скоєних на тимчасово окупованих територіях не єдина проблема. Так, діяльність правоохоронних органів та правосуддя, а також державних органів, які здійснюють виконання судових рішень, не виступає як об'єкт систематичного і комплексного статистичного спостереження та аналізу результатів Держстатом. Кримінальна статистика, не відповідає сучасним європейським стандартам, в ній наявний цілий комплекс прогалин, неузгодженостей.

Досліджуючи проблеми насильницької злочинності, що виникають у процесі розслідування злочинів цієї категорії, неможливо створити повне уявлення про детермінанти, профілактику чи інші ознаки насильницької злочинності без аналізу самої конкретної особи насильницького злочинця. Досліджуючи кримінологічні показники насильницьких злочинців, слід, у першу чергу, зупинитися на таких критеріях, як вік, соціально-освітній показник, характеристика особи, тощо

Однією із особливостей зазначених злочинів є переважно одноособове їх вчинення. Встановлено, що 87,3% умисних вбивств і 90,6% тяжких тілесних ушкоджень були вчинені одним злочинцем. Так, наприклад, у 2025 році з 27900 умисних вбивств всього 21 були вчинені за попередньою змовою групою осіб, а у 2026 році з 31363 –25 .

Отже, виходячи із таких показників, можна судити про ситуативність такої категорії злочинів, а також про вчинення їх внаслідок сімейно-побутового конфлікту. Винні, в більшості випадків, заподіювали смерть або тяжкі тілесні ушкодження потерпілим у запалі негативних емоцій, на ґрунті раптово виниклого умислу.

Ситуативними можуть бути вбивства різних видів, а саме вчинені: на побутовому ґрунті; із корисливих мотивів; з хуліганських мотивів; через сексуальний потяг; з метою приховання інших протиправних діянь та аморальних вчинків [1, с. 5-11].

Іншим фактором вчинення злочинів такої категорії є сімейно-побутовий конфлікт. Сімейно-побутовий конфлікт при тяжких насильницьких злочинах проти особи слід розуміти як гостре зіткнення між членами сім'ї й сімейно-побутового оточення, що виникає на основі протиборства їх протилежних поглядів, інтересів, позицій, потреб, які формуються та усвідомлюються в процесі міжособистісного спілкування, характеризуються прагненням спричинити максимальну шкоду суперечнику шляхом насильницького впливу і супроводжуються негативними емоціями його учасників.

Значне місце у кримінально-правовій характеристиці структури аналізованої категорії злочинів займають їх мотив і мета. На практиці більш ніж ½ мотивів злочинів проходять як «неприязні стосунки», категорія не визначена чинним кримінальним законодавством. Цікава деталь: вказане формулювання охоплює досить широкий спектр мотивів злочинної поведінки, тому формальне зведення нерідко різних за змістом мотивів під «неприязні стосунки» пояснюється певними складнощами, які виникають у судово-слідчих органів при встановленні дійсних мотивів цих злочинів. [2, с.16].

Таким чином, скоєння насильницьких злочинів пов'язане з агресією. У психології агресія розглядається як поведінка або дія, спрямована на завдання фізичної або психічної шкоди або на знищення іншої людини. Готовність окремої особистості до агресії виявляється як негативна межа – агресивність. Необхідно зазначити, що термін «агресія» означає напад. Агресивні злочини мають злісний, деструктивний характер і переслідують мету заподіяти потерпілому шкоду. [8, с. 88].

Кримінальна активність має і вікові особливості, зокрема, умисні вбивства за 6 місяців 2026 року вчинили молоді особи у віці від 18 до 45 років - 160 осіб з загальної кількості 377. Висока кримінологічна активність зазначеної вікової групи, пояснюється мотивами вчинення злочину у молодому віці: корисливість, хуліганські мотиви, алкогольне обтяження, приховання інших протиправних діянь. Характерна особливість цих кримінальних правопорушень полягає в тому, що вони переважно вчиняються чоловіками; так, з усієї кількості злочинців, що вчинили умисне вбивство жінок всього 20 [5].

Важливою у віктимологічному плані є характеристика поведінки жертви та визначення її ролі у створенні криміногенної ситуації. Кримінологи давно побачили, що поведінка жертв умисних вбивств та умисних тілесних ушкоджень від цих злочинів часто розглядається як провокуюча та така, що впливає на зародження у злочинця умислу на вчинення насильства [7, с.172].

То ж, віктимна поведінка потерпілого є однією з умов, що сприяє вчиненню особливо тяжких насильницьких злочинів. Часто, потерпілий напередодні злочину поводить себе агресивно, протиправно, провокаційно й іноді лише випадок вирішує, хто стане жертвою, а хто злочинцем. Найбільшою віктимністю відрізняються чоловіки молодого віку, котрі ніде не працюють або займаються некваліфікованою працею, рівню якої відповідає рівень особистості. Поведінка більшості з них часто відіграє провокуючу роль.

Крім того, освітній рівень також впливає на вчинення особливо тяжких насильницьких злочинів. Так, якщо аналізувати звіти Офісу Генерального прокурора, доходимо висновку що найбільше кримінальних правопорушень вчиняють особи, що мають тільки середню або професійно-технічну освіту. Частка порушників серед осіб з передвищою та вищою освітою менше майже у два рази.

Світові тенденції зниження абсолютних і відносних показників злочинності, можна пояснити по-перше, хвилеподібним розвитком злочинності, яка як складне соціальне явище розвивається за своїми канонами, по-друге, тим, що підлітки і молодь масово пішли у віртуальний світ, по-третє, новою

структуризацією злочинності, коли звичні найбільш розповсюджені правопорушення (крадіжки, грабежі, розбої) заміщаються шахрайством, кіберзлочинами, іншими високолатентними суспільно небезпечними діяннями, по-четверте, результатом масового використання сучасних заходів безпеки.

Виходячи з вищезазначеного доходимо висновку, що детермінантами особливо тяжких насильницьких злочинів характеризуються цілою низкою різних за природою і змістом факторів. Саме тому протидія злочинності повинна здійснюватися на засадах кримінологічного прогнозування, системності, плановості та комплексності. І головне, суспільство, представники правоохоронних органів мусять зрозуміти, що загальносоціальне та спеціально-кримінологічне запобігання мають стати пріоритетним напрямком протидії злочинності. Запобігання злочинності є найбільш гуманним способом впливу на криміногенну обстановку в суспільстві. Зокрема, вплив на особистість злочинця, умови й обставини, що сприяють формуванню й реалізації злочинного задуму, за допомогою превентивних засобів, дає змогу переривати злочинну діяльність на стадії задуму або у процесі, не допустити настання шкідливих наслідків від посягань на суспільні відносини.

Зменшення показників офіційної статистики, не означає зменшення кількості злочинів. Кримінальна статистика не відповідає сучасним вимогам, в ній наявний цілий комплекс прогалин, дані подаються уривчасто, фрагментарно. Враховуючи це, не зайвим було б розробити та прийняти нормативно-правовий акт про кримінальну статистику, яким мають визначатися сфера, об'єкти, центральний орган вироблення кримінальної статистики та засади його взаємодії з іншими органами, для вироблення загальнодержавної кримінальної статистики, напрями та суб'єкти її використання, а також внесення змін та доповнень до законів, які б забезпечували подання, перевірку якості та достовірності даних для статистичних цілей.

References

1. Бойко В.В. Кримінологічні характеристики тяжкої насильницької злочинності проти життя та здоров'я особи в особливо великих містах України. *Прикарпатський юридичний вісник*. Випуск 6 (21) том 2, 2017 с.118-122

2. Головкін Б. М. Кримінологічні проблеми умисних вбивств і тяжких тілесних ушкоджень, що вчиняються у сімейно-побутовій сфері: монографія / Б. М. Головкін. Харків: Нове слово, 2004. 252 с.

3. Досудове розслідування: навч.-метод. посіб. / Ю. П. Аленін, Л. І. Аркуша, І. В. Гловюк, В. К. Волошина, О. В. Малахова, О. О. Торбас. Одеса, 2020. 141 с. 5-11;

4. Єдиний звіт про кримінальні правопорушення за січень-червень 2025 року. Форма № 1 (місячна). Затверджено наказом ГПУ від 23 жовтня 2020 р. № 299. URL: https://gp.gov.ua/ua/posts/statistika

5. Єдиний звіт про кримінальні правопорушення за січень-червень 2026 року. Форма № 1 (місячна). Затверджено наказом ГПУ від 23 жовтня 2020 р. № 299. URL: https://gp.gov.ua/ua/posts/statistika

6. Кулик Л.М. Кримінологічна характеристика особистості озброєних злочинців, які вчинюють агресивно-насильницькі кримінальні правопорушення. Юридичний науковий електронний журнал. Вип. № 5, 2023. с.289-292

7. Старко О. Л. Особливості віктимологічної характеристики жертв насильницьких злочинів проти особи. Порівняльно-аналітичне право. 2020. №2. С.171-174.

8. Топчій В.В. Кримінологічна характеристика особи насильницького злочинця. *Європейські перспективи* № 5, 2015 с.85-91

9. Шалгунова С.А. Особа насильницького злочинця: монограф. 2-е вид., доп. і перероб. Шалгунова С.А. Дніпропетровськ: Дніпроп. держ. ун-т внутр. справ; Ліра ЛТД, 2012. 548 с.

10. Шостко О. Ю., Подільчак О. М. Сучасні світові тенденції злочинності. *Проблеми законності*. 2020. Вип. 148 с.184-200

11. Numbeo: global database веб-сайт. URL: https://www.numbeo.com/crime/rankings_by_country.jsp (дата звернення: 30.07.2026).

MEDICAL SCIENCES

LEFT-CHEEK SKIN HYDRATION ASYMMETRY AND ITS RELATIONSHIP TO VISUAL FACIAL AGING: DATA FROM A PILOT BIOIMPEDANCE STUDY IN FLORIDA WOMEN

Ias O.
M.Sc.
Licensed Esthetician, IAS Skin Care Research, Winter Garden, Florida, USA
ORCID: 0009-0008-7846-6771
ClinicalTrials.gov: NCT07564869
DOI: 10.5281/zenodo.22091585

Abstract

Background: Standard automotive side-window glass transmits UVA radiation (320–400 nm) while blocking UVB. In right-hand-traffic countries, the driver's left side of the face receives chronic unfiltered UVA during every commute. Clinical case reports and epidemiological studies document asymmetric photodamage on the driver's side, but whether this asymmetry is detectable as a hydration difference by bioimpedance in a cosmetological outpatient sample has not been examined.

Methods: Data come from a cross-sectional observational pilot study (ClinicalTrials.gov: NCT07564869; n = 30 women, ages 30–60, Florida). Skin hydration was measured at seven facial zones with the BT-Analyze bioimpedance device (three readings per zone after 20-min acclimatization). Visual aging was rated from standardized photographs by a blinded expert cosmetologist using a modified six-criterion Glogau scale (0–18 points). Left vs. right cheek hydration was compared with the Wilcoxon signed-rank test. Zone-specific Spearman rank correlations with total Glogau score were computed for all seven zones.

Results: 18 of 30 participants (60%) had lower hydration at the left cheek (29.82 ± 11.38 units) than the right (30.81 ± 13.16 units). The Wilcoxon signed-rank test did not reach significance ($W = 170.0$, $p = 0.304$), reflecting inadequate statistical power rather than absence of effect at n = 30. The left cheek showed the strongest Spearman correlation with Glogau score across all seven zones ($r_s = -0.811$, $p < 0.001$), ahead of the right cheek ($r_s = -0.759$, $p < 0.001$). All seven zones reached statistical significance ($p \leq 0.004$).

Conclusions: A consistent directional asymmetry was identified: lower hydration and a stronger aging correlation on the driver's side of the face. Replication in a larger sample with direct measurement of cumulative driving time is needed. Pending that confirmation, the data give practitioners a practical and specific reason to pay extra attention to the left cheek of clients who drive regularly in high-UV environments.

Keywords: skin hydration asymmetry; UVA radiation; automotive side glass; left cheek; facial aging; bioimpedance; Florida; photoaging; cosmetology; pilot study.

1. Introduction

1.1 UVA and automotive glass

The solar spectrum reaching the Earth's surface spans UVB (290–320 nm) and UVA (320–400 nm). These two bands differ in both their penetration depth and their effects on skin biology. UVB is largely absorbed in the epidermis, where it causes direct DNA damage and is the primary driver of sunburn. UVA penetrates more deeply, reaching the dermal layer, where it generates reactive oxygen species that damage collagen, elastin, and hyaluronic acid through indirect photochemical pathways [1, 2].

Standard laminated windshield glass contains a polyvinyl butyral interlayer that absorbs most UVA. Side-door windows, however, are manufactured from tempered (toughened) glass without this interlayer. Almutawa and Buabbas measured the spectral transmission of standard automotive glass and found that tempered side windows transmit 63–71% of incident UVA in the 340–380 nm range [3]. Parisi et al. confirmed high UVA transmission through several automotive glass types tested in a Queensland solar environment [4]. The practical implication is that a driver's left side of the face — in right-hand-traffic countries — receives near-full UVA irradiance during every minute behind the wheel.

Most drivers are unaware of this. Studies on sun-protective behavior consistently show that people underestimate UV exposure received through glass. This informational gap may mean that left-side UVA accumulation goes unmitigated for decades.

1.2 Documented consequences of asymmetric driving exposure

The clinical literature contains vivid documentation of what chronic unilateral automotive UVA exposure does over time. Gordon and Brieva published a photographic case report in the New England Journal of Medicine showing a 69-year-old truck driver whose left cheek, temple, and neck appeared more than a decade older than the right side after 28 years of occupational driving [5]. The right side of the face, shielded from the window, showed comparatively minimal photoaging. This is not an isolated finding: Butler and Fosko analyzed laterality in 1,047 patients with nonmelanoma skin cancer at a US dermatology center and found a statistically significant 1.3:1 ratio of left- to right-sided tumors [6]. The excess was most pronounced for the head and neck region and was consistent with driver-side sun exposure in a population where most individuals drive.

These reports address macroscopic, long-term outcomes — cancer and severe dermatoheliosis. Whether

the same lateralized UVA exposure produces detectable subclinical asymmetry in skin hydration — years before visible pathology develops — is a separate question that the published literature has not addressed with bioimpedance methodology in a cosmetological outpatient sample.

1.3 Skin hydration and UVA

UVA-induced damage to the extracellular matrix has direct consequences for skin hydration. Hyaluronic acid (HA) is the primary water-retention polymer in the dermis, holding water at up to 1,000 times its own weight [7]. UVA activates matrix metalloproteinases (MMP-1, MMP-3, MMP-9) that degrade HA and collagen [8, 9]. Separately, chronic UVA exposure reduces fibroblast synthesis of new HA [10]. The result is progressive depletion of the dermis' water-retention capacity on the more-exposed side.

If this depletion is lateralized — left side more than right in Florida drivers — a bioimpedance device measuring stratum corneum water content should detect a lower reading at the left cheek than the right. The stratum corneum hydration measured by capacitance or bioimpedance reflects, at least in part, the aquaporin-mediated transport of water from the dermis; chronically depleted dermal HA would reduce this reservoir and produce a lower surface reading over time.

1.4 Study context: Florida

Florida provides an unusually high-exposure environment for testing this hypothesis. The state's annual UV index consistently exceeds 7 for most of the year and reaches 10–11 at summer peak — among the highest in the continental United States. Vehicle ownership exceeds 90% of households, and public transit ridership is low; most adults accumulate several hundred to several thousand hours of driving per year. A 30-minute daily commute, five days per week, amounts to 130 hours per year of driver-side facial UVA exposure through unshielded tempered glass. Over 10 years, that is 1,300 cumulative hours.

The present study measured skin hydration at seven facial zones in 30 Florida women aged 30–60 years and tested whether the left cheek consistently showed lower hydration than the right, and whether the left cheek showed a stronger correlation with visual aging severity. The study did not measure driving time — a limitation acknowledged throughout — but the Florida context and the directional data together provide a useful starting point for future prospective investigation.

2. Material and Methods

2.1 Study design and ethical framework

A cross-sectional observational pilot study was conducted at IAS Skin Care Research (Winter Garden, Florida, USA; ClinicalTrials.gov: NCT07564869; protocol DOI: https://zenodo.org/records/20014665). The study adhered to the STROBE reporting guidelines for cross-sectional studies and was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki. Written informed consent was obtained from all 30 participants before data collection. As a non-interventional observational study using only non-invasive bioimpedance measurements and standardized photography, formal IRB review was not applicable under the study's jurisdiction.

2.2 Participants

Thirty women aged 30–60 years were enrolled by convenience sampling through announcements at the esthetic practice. They were allocated to three age groups of ten: Group 1 (30–40 yr), Group 2 (40–50 yr), and Group 3 (50–60 yr). Inclusion criteria: willingness to attend without makeup and without cosmetic product application for at least 4 hours before the visit. Exclusion criteria: active dermatological disease, injectable aesthetic procedures within 6 months, systemic medications that affect skin condition (retinoids, corticosteroids), and pregnancy or lactation. No participant was excluded for any of these criteria; all 30 enrolled participants completed the visit.

2.3 Skin hydration measurement

Hydration was measured with the BT-Analyze bioimpedance moisture analyzer (Bio-Therapeutic, Seattle, WA) [11]. After a 20-minute acclimatization period in the measurement room (temperature 20–22°C, relative humidity 40–60%), the sensor was applied to seven facial sites: forehead center, nose tip, chin, right cheek, left cheek, right periorbital zone, and left periorbital zone. Each site was measured three times consecutively; the zone score was the mean of three readings. BT-mean was the mean of all seven zone scores. The probe was disinfected between participants. All measurements were conducted between 10:00 and 14:00 to minimize time-of-day variation in hydration. The primary variables for the laterality analysis were the left-cheek zone score and the right-cheek zone score.

2.4 Visual aging assessment

Visual aging was rated from standardized frontal photographs taken under fixed conditions: 50-cm camera-to-subject distance, two softboxes positioned at 45°, neutral gray background, manual camera mode with identical settings for all participants. No digital post-processing was applied. An expert cosmetologist with more than seven years of clinical experience rated all 30 photographs. She received the images labeled only with anonymous codes (P01–P30) presented in a randomized order, without access to participant age, group assignment, or hydration data. Rating used a six-criterion modified Glogau scale (Table 1) [12], each criterion scored 0 (absent) to 3 (severe), total range 0–18 points. Grade I: 0–4; Grade II: 5–8; Grade III: 9–13; Grade IV: 14–18.

2.5 Covariate questionnaire

A structured questionnaire collected age, Fitzpatrick skin type (I–VI), daily water intake, smoking status, menopausal status, and self-rated outdoor sun exposure (low / moderate / high). Crucially, the questionnaire did not include a question about driving time. This was a design limitation: participants were not specifically asked about car commuting because the laterality hypothesis emerged from inspection of the hydration data during analysis, after data collection was complete. Future studies must measure driving time directly.

2.6 Statistical analysis

Left vs. right cheek hydration was compared with the Wilcoxon signed-rank test (two-tailed, $\alpha = 0.05$). A

post-hoc power analysis used G*Power 3.1 to estimate the power achieved by $n = 30$ for the within-subject comparison. Spearman rank correlations (r_s) between each of the seven zone scores and total Glogau score were computed to rank zones by association strength. Zone-specific results are reported with exact p-values. All calculations used Python (SciPy v1.11, NumPy v1.24). The significance threshold was $\alpha = .05$, two-tailed.

3. Results

3.1 Sample characteristics

All 30 participants completed the visit without withdrawals; no data were missing. Mean age was 44.7 ± 8.1 yr (range 33–60). Fitzpatrick type distribution: I–II in 18 (60%), III–IV in 10 (33%), V–VI in 2 (7%). Self-reported sun exposure: low in 6 (20%), moderate in 20 (67%), high in 4 (13%). Regular moisturizer use: 20 participants (67%). Menopausal status: premenopausal 18 (60%), perimenopausal 8 (27%), postmenopausal 4 (13%).

3.2 Left vs. right cheek hydration

Mean left-cheek hydration was 29.82 ± 11.38 units; mean right-cheek hydration was 30.81 ± 13.16 units. Left-cheek hydration was lower than right in 18 of 30 participants (60%); in 11 participants (37%) the right was lower than the left; in 1 participant (3%) the values were equal. The Wilcoxon signed-rank test returned $W = 170.0$, $p = 0.304$. Post-hoc power analysis confirmed that $n = 30$ achieves approximately 25% power for a within-subject correlation of $r = 0.20$ at $\alpha = 0.05$, one-tailed. A sample of at least 47 participants would be required to detect $r_s = 0.35$ at 80% power. The non-significant Wilcoxon result therefore reflects an underpowered comparison rather than strong evidence against a real effect.

3.3 Zone-specific Spearman correlations with visual aging

All seven facial zones showed statistically significant negative Spearman correlations with total Glogau score (Table 2). The left cheek produced the largest coefficient ($r_s = -0.811$, $p < 0.001$), followed by the right cheek ($r_s = -0.759$, $p < 0.001$) and forehead ($r_s = -0.727$, $p < 0.001$). The periorbital zones were moderately associated (left: $r_s = -0.635$, $p = 0.0002$; right: $r_s = -0.507$, $p = 0.004$). The nose was the weakest site ($r_s = -0.572$, $p = 0.001$). The 0.052-point gap between left and right cheek correlation coefficients is small in absolute terms but directionally consistent with the automotive UVA hypothesis: the side that should receive more chronic photodamage shows the stronger hydration–aging correlation.

3.4 Questionnaire findings relevant to laterality

No participant reported a systematic difference in perceived sun exposure between the left and right sides of the face. This was expected: outdoor sun exposure strikes both sides of the face relatively symmetrically when walking or sitting outside, and most participants were unaware that automotive side glass transmits UVA specifically. During debriefing, when participants were informed about UVA transmission through tempered glass, 24 of 30 (80%) expressed surprise. This informational gap is relevant to the interpretation: the self-reported 'sun exposure' variable in the questionnaire does not capture driving-related UVA, which means that confounding by sun exposure cannot be fully addressed without a specific driving-time measure.

Table 1.

Six-criterion modified Glogau scale used for blinded visual aging assessment.

Criterion	0 — Absent	1 — Mild	2 — Moderate	3 — Severe
Forehead rhytids	None	Dynamic	Static, shallow	Static, deep
Periorbital rhytids	None	On smiling	Visible at rest	Deep, multiple
Nasolabial folds	Absent	Faint	Distinct	Deep, overhanging
Skin turgor/laxity	Preserved	Mild reduction	Visible ptosis	Marked ptosis
Dyspigmentation	Even tone	Minor	Visible spots	Marked
Skin texture	Smooth	Slight roughness	Visible dryness	Coarse

Total score 0–18. Grade I: 0–4; II: 5–8; III: 9–13; IV: 14–18.

Table 2.

Zone-specific Spearman correlations between facial hydration and Glogau score (n = 30).

Facial Zone	r_s	p-value	Significance
Left cheek	**−0.811**	<0.001	***
Right cheek	−0.759	<0.001	***
Forehead	−0.727	<0.001	***
Chin	−0.723	<0.001	***
Left periorbital	−0.635	0.0002	***
Nose	−0.572	0.001	**
Right periorbital	−0.507	0.004	**

*All correlations negative. Ranked by $|r_s|$. ***p < 0.001; **p < 0.01.*

4. Discussion

4.1 Interpretation of the laterality pattern

The left cheek showed the strongest correlation with visual aging across all seven facial zones measured. The numerical gap between left and right cheek coefficients ($r_s = -0.811$ vs. -0.759) is modest, but the direction is unambiguous. If chronic left-side UVA exposure depletes dermal hyaluronic acid faster on the driver's side — through MMP activation and reduced fibroblast synthesis [8, 9, 10] — bioimpedance should register a lower stratum corneum hydration at that zone over time. The 60% prevalence of lower left-cheek hydration in this sample is exactly the direction the UVA hypothesis predicts.

The Wilcoxon test did not reach significance ($p = 0.304$). This outcome should not be read as evidence against the effect. Post-hoc power analysis shows that n = 30 provides roughly 25% power for the within-subject paired comparison at the expected effect size. In other words, even if the true asymmetry exists, this study was more likely to miss it than detect it. The 60% directional prevalence in the expected direction, combined with the left cheek's strongest zone-specific correlation, provides convergent suggestive evidence. What the data do not provide is statistical confirmation: that requires a larger, adequately powered sample.

4.2 Comparison with published photodamage literature

The directional pattern in this sample aligns with the documented consequences of driving-associated UVA exposure. Gordon and Brieva's case described extreme unilateral dermatoheliosis after 28 years of left-side automotive exposure [5]; the present participants had much shorter exposure histories, which likely explains why the asymmetry is visible in direction but does not yet manifest as a statistically detectable hydration difference at n = 30. Butler and Fosko's finding of excess left-sided skin cancers [6] represents the long-term outcome; lower left-cheek hydration would be a plausible intermediate step on that trajectory.

None of the existing laterality studies used bioimpedance to detect hydration asymmetry in an esthetic outpatient setting. The present data show that the BT-Analyze device, used under standardized conditions, produces a directionally consistent signal. Quantifying the true magnitude of the difference requires a study specifically powered for the within-subject comparison.

4.3 Clinical implications for cosmetology practice

Even without causal confirmation, the present data carry a practical message. In Florida — and in any high-UV, car-dependent state or country — a cosmetologist who routinely measures bilateral cheek hydration can identify clients with systematic left-side deficits. When a client who drives regularly shows consistently lower left-cheek hydration across multiple visits, that pattern is an objective, instrument-derived data point supporting a specific conversation about photoprotection before driving.

The recommendation that follows is concrete and low-cost: apply SPF before getting in the car, not only before going outside. Window tinting that includes UVA-blocking film is a structural option for clients who drive long distances. These recommendations do not require proof of causation to be reasonable — they follow from established knowledge that automotive side glass transmits UVA [3, 4] and that UVA accelerates visible skin aging [1, 2].

More broadly, the left-right asymmetry in zone-specific Glogau correlation suggests that the left cheek may be a sensitive monitoring site for photodamage accumulation in Florida drivers. A cosmetologist who tracks left-to-right hydration ratios over time could use that ratio as a practical indicator warranting a targeted photoprotection conversation.

4.4 Limitations

This study has several important limitations that constrain its conclusions. First, the cross-sectional design cannot establish causation. Lower left-cheek hydration could reflect driving-related UVA, but also sleeping position, habitual side preference during product application, structural differences in sebaceous gland density, or unmeasured genetic factors. Second, n = 30 is underpowered for the within-subject laterality comparison; the Wilcoxon result is inconclusive rather than negative. Third, the questionnaire did not capture driving time or window tint status — the two variables most directly relevant to the automotive UVA hypothesis. This omission is a fundamental methodological gap for interpreting the laterality finding. Fourth, a single blinded assessor was used, precluding inter-rater reliability estimation. Fifth, convenience sampling from

one Florida esthetic practice limits generalizability. Sixth, BT-Analyze measures stratum corneum hydration only; dermal HA changes would require high-frequency ultrasound or other methods to quantify directly.

5. Conclusions

In this pilot sample of 30 Florida women, the left cheek had lower bioimpedance hydration than the right in 60% of participants and showed the strongest Spearman correlation with visual aging scores among seven facial zones ($r_s = -0.811$, $p < 0.001$). The Wilcoxon test comparing left and right cheek was not significant, but post-hoc power analysis shows that $n = 30$ was substantially underpowered for this comparison. The directional pattern is consistent with the established UVA transmission of automotive side glass and the published evidence on driver-side photodamage.

A prospective study with direct measurement of cumulative driving time, window tint status, and SPF application habits before driving — and with adequate sample size ($n \geq 47$) — is needed to test the causal hypothesis. Until that study is completed, the data presented here give estheticians working in high-UV, car-dependent environments a specific and instrument-based reason to track left-to-right cheek hydration asymmetry and counsel clients accordingly.

Conflict of Interest

The author is the founder of IAS Skin Care Research, the esthetic practice where data collection took place. No commercial products were evaluated in this study and no financial relationships with device manufacturers exist.

Funding

This research received no external funding. The study was self-funded by the author.

Data Availability

The dataset supporting the conclusions of this study is available from the corresponding author upon reasonable request.

References

1. Flament F., Bazin R., Laquieze S. et al. Effect of the sun on visible clinical signs of aging in Caucasian skin. Clin Cosmet Investig Dermatol. 2013;6:221–232.

2. Proksch E., Brandner J.M., Jensen J.M. The skin: an indispensable barrier. Exp Dermatol. 2008;17(12):1063–1072.

3. Almutawa F., Buabbas H. Photoprotection by window glass, automobile glass, and sunglasses. Dermatol Ther. 2020;33(3):e13362.

4. Parisi A.V., Turnbull D.J., Kimlin M.G. Dosimetric and spectroradiometric investigations of glass filtered solar UV. Photochem Photobiol. 2007;83(4):777–781.

5. Gordon J.R.S., Brieva J.C. Unilateral dermatoheliosis. N Engl J Med. 2012;366(16):e25.

6. Butler S.T., Fosko S.W. Increased prevalence of left-sided skin cancers. J Am Acad Dermatol. 2010;63(6):1006–1010.

7. Papakonstantinou E., Roth M., Karakiulakis G. Hyaluronic acid: a key molecule in skin aging. Dermatoendocrinol. 2012;4(3):253–258.

8. Quan T., Fisher G.J. Role of age-associated alterations of the dermal extracellular matrix microenvironment in human skin aging. Gerontology. 2015;61(5):427–434.

9. Choi J.W., Kwon S.H., Huh C.H. et al. The influences of skin visco-elasticity, hydration level and skin surface roughness on the formation of wrinkles. Skin Res Technol. 2013;19:e349–e355.

10. Verdier-Sévrain S., Bondé F. Skin hydration: a review on its molecular mechanisms. J Cosmet Dermatol. 2007;6(2):75–82.

11. Berardesca E., Loden M., Serup J. et al. The revised EEMCO guidance for the in vivo measurement of water in the skin. Skin Res Technol. 2018;24(3):351–358.

12. Glogau R.G. Aesthetic and anatomic analysis of the aging skin. Semin Cutan Med Surg. 1996;15(3):134–138.

ECHOCARDIOGRAPHIC ASSESSMENT OF THE MORPHOFUNCTIONAL PARAMETERS OF THE FETAL HEART IN HEMOLYTIC ANEMIA

Karimov M.
PhD Candidate, Center for the Development of Professional Qualifications of Medical Workers, Tashkent, Uzbekistan
Normuradova N.
DSc, Center for the Development of Professional Qualifications of Medical Workers, Tashkent, Uzbekistan
DOI: 10.5281/zenodo.22091599

Abstract

The article presents the results of fetal echocardiography using the cardiofemoral index (CFI) and myocardial performance index (MPI) in fetuses with hemolytic anemia. The study included 72 pregnant women: 39 with fetal hemolytic anemia and 33 with uncomplicated pregnancies. Fetuses with anemia demonstrated a statistically significant increase in both CFI and the Tei index compared with the control group ($p<0.001$). In the study group, a statistically significant positive correlation was found between CFI and the median multiple (MoM) of the peak systolic velocity in the middle cerebral artery (MCA-PSV) ($\rho=0.359$; $p=0.025$). After adjustment for gestational age, the association between absolute MCA-PSV and CFI remained statistically significant ($r=0.426$; $p=0.008$). Multivariable regression analysis confirmed an independent positive association between MCA-PSV MoM and CFI after adjustment for gestational age and fetal weight ($\beta=0.427$; $p=0.009$). However, no statistically significant correlation was found between CFI and the Tei index ($\rho=-0.102$; $p=0.535$), nor between the Tei index and MCA-PSV MoM ($\rho=0.191$; $p=0.245$). These findings suggest that CFI predominantly reflects the morphometric adaptation of the fetal heart to the hemodynamic burden associated with anemia, whereas the Tei index characterizes functional myocardial alterations. The combined use of CFI and the Tei index may improve the diagnostic value of fetal echocardiography in assessing cardiovascular adaptation in fetuses with hemolytic anemia.

Keywords: cardiofemoral index, cardiomegaly, myocardial performance index, fetal hemolytic anemia.

Introduction

Fetal hemolytic anemia caused by maternal alloimmunization to erythrocyte antigens is associated with reduced blood oxygen-carrying capacity and the development of compensatory hyperdynamic circulation [1,2]. As anemia progresses, cardiac output increases, myocardial workload rises, and cardiac chamber dilatation may develop, reflecting structural adaptation of the fetal cardiovascular system [2,3].

The primary non-invasive method for diagnosing and monitoring fetal anemia remains the assessment of the peak systolic velocity (PSV) of blood flow in the middle cerebral artery (MCA), standardized as multiples of the median (MoM) [2,4]. However, MCA-PSV predominantly reflects the systemic hemodynamic response to anemia and does not allow direct assessment of the extent of structural remodeling or functional myocardial stress [5]. Therefore, the identification of additional echocardiographic markers of fetal cardiovascular adaptation remains clinically relevant.

One such parameter is the cardiofemoral index (CFI), calculated as the ratio of the transverse external cardiac diameter to femoral length. An increase in CFI reflects enlargement of the heart and the development of cardiomegaly with progressive anemia [6,7]. However, an increase in cardiac size does not necessarily indicate preserved functional myocardial reserve. Therefore, CFI assessment is best performed in conjunction with parameters reflecting myocardial function. The Tei index (myocardial performance index, MPI) is an integrated echocardiographic parameter that characterizes the combined systolic and diastolic function of the ventricle and enables the detection of myocardial functional changes even in the absence of pronounced abnormalities in individual phases of the cardiac cycle [8,9]. CFI and the Tei index are complementary echocardiographic parameters for assessing the morphofunctional adaptation of the fetal heart in hemolytic anemia [6,7,10].

Accordingly, investigation of the relationship between the cardiofemoral index and the Tei index is of scientific and practical interest for the comprehensive assessment of the morphofunctional status of the fetal heart in hemolytic anemia.

The aim of the study was to evaluate the diagnostic significance of the cardiofemoral index and the myocardial performance index (MPI, Tei index) in the comprehensive assessment of the morphofunctional status of the fetal heart in hemolytic anemia and to determine their relationship with the severity of anemia.

Materials and Methods

This prospective comparative study included 72 pregnant women who underwent fetal echocardiography. The study group comprised 39 pregnant women with Rh-negative blood whose fetuses were diagnosed with hemolytic anemia of varying severity. The control group consisted of 33 pregnant women with Rh-positive blood without ultrasound signs of fetal hemolytic disease. The severity of fetal anemia was assessed using the MoM value of the peak systolic velocity in the middle cerebral artery (MCA-PSV); a MoM value ≥ 1.5 was considered indicative of fetal anemia.

Ultrasound examinations were performed using a Samsung WS80A high-end ultrasound system (Samsung Medison, Republic of Korea) with a 3.5–5.0 MHz convex transducer. During fetal echocardiography, the cardiofemoral index was determined as the ratio of the transverse cardiac dimension to femoral length: CFI = CW/FL, where CW denotes cardiac width in millimeters and FL denotes femoral length in millimeters. The myocardial performance index (MPI, Tei index) was

calculated using Doppler echocardiography as the ratio of the sum of the isovolumetric contraction time (IVCT) and isovolumetric relaxation time (IVRT) to the ejection time (ET): Tei index = (IVCT + IVRT)/ET (Fig. 1).

Statistical analysis was performed using SPSS software. The normality of the distribution of quantitative variables was assessed using the Shapiro–Wilk test. For normally distributed data, values were expressed as mean ± standard deviation (M ± SD), and the Student's t-test was used for between-group comparisons. For non-normally distributed data, values were presented as the median and interquartile range, Me (Q1; Q3), and the Mann–Whitney U test was used for between-group comparisons. Correlation analysis was performed using Spearman's rank correlation coefficient, including partial correlation analysis controlling for gestational age. Multiple linear regression analysis was performed to identify independent factors associated with CFI, with MCA-PSV MoM, gestational age, and fetal weight included as predictors. Differences were considered statistically significant at $p<0.05$.

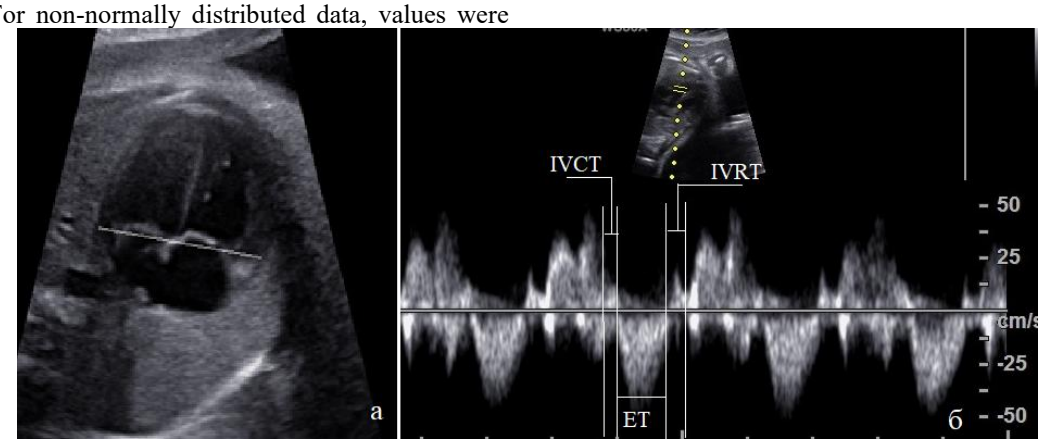

Fig. 1. Measurement of cardiac width and the myocardial performance index. (a) Four-chamber view of the fetal heart with measurement of cardiac width at the level of the atrioventricular valves; (b) calculation of the myocardial performance index.

Results. Gestational age and fetal weight were normally distributed, whereas the Tei index, CFI, and MCA-PSV showed non-normal distributions. Fetuses with hemolytic anemia had a statistically significant increase in the cardiofemoral index compared with those in the control group (U = 1.5; Z = −7.266; $p<0.001$), indicating pronounced cardiac morphometric remodeling with an increase in relative cardiac dimensions. The Tei index was also significantly higher in the study group than in the control group (U = 49.0; Z = −6.726; $p<0.001$), indicating impaired integrated systolic and diastolic myocardial function in fetuses with hemolytic anemia (Table 1).

Table 1.

Cardiofemoral index, myocardial performance index, and MCA-PSV

	Study group (n=39)	Control group (n=33	U-test, t-test	*p*-value
Cardiofemoral index, Me (Q1;Q3)	0,68 (0,65; 0,72)	0,56 (0,53; 0,58)	U=1,5	p <0,001*
Myocardial performance index, Me (Q1;Q3)	0,62 (0,57; 0,64)	0,44 (0,41; 0,47)	U=49,0	p <0,001*
MCA-PSV, Me (Q1;Q3) (cm/s)	77,0 (61,0; 81,0)	61,5 (57,3; 62,6)	U=325,0	p <0,001*
MCA-PSV, (MoM) Me (Q1;Q3)	1,60 (1,57; 1,77)	1,0 (0,9;1,0)	U=8,5	p <0,001*
Gestational age, M±SD (week)	30,96±4,47	31,89±3,41	t=-0,977	p = 0,332
Fetal weight M±SD (gr)	1765,25±772,65	1853,02±701,41	t=-0,501	p = 0,618

Statistically significant differences at p<0.05.

Spearman correlation analysis revealed no statistically significant association between the cardiofemoral index and the Tei index in either study group. In the group of fetuses with hemolytic anemia, the correlation was weak, inverse, and not statistically significant ($\rho = -0.102$; $p = 0.535$; n = 39). A similarly weak inverse correlation was observed in the control group, which also did not reach statistical significance ($\rho = -0.175$; $p = 0.329$; n = 33).

Thus, despite the statistically significant increases in both CFI and the Tei index in fetuses with hemolytic anemia compared with the control group, no linear monotonic relationship between the morphometric parameter reflecting cardiac size and the integrated parameter of myocardial function was identified within either group. These findings suggest that structural and functional cardiac remodeling in hemolytic anemia may occur relatively independently, with CFI and the

Tei index reflecting different components of the fetal cardiovascular adaptive response.

In the group of fetuses with hemolytic anemia, correlation analysis was performed to assess the relationships of CFI and the Tei index with parameters reflecting the severity of anemia. A statistically significant positive correlation was identified between CFI and the MoM of peak systolic velocity in the middle cerebral artery (MCA-PSV MoM) ($\rho = 0.359$; $p = 0.025$; $n = 39$), indicating a tendency toward an increase in relative cardiac dimensions with increasing severity of fetal anemia.

When partial correlations were assessed after controlling for gestational age, this association persisted and became more pronounced. A moderate positive correlation was found between absolute MCA-PSV and CFI ($r = 0.426$; $p = 0.008$; $df = 36$). This finding indicates that the association between increased blood flow velocity in the middle cerebral artery and CFI cannot be explained solely by differences in gestational age.

In contrast, no statistically significant association was identified between the Tei index and MCA-PSV MoM ($\rho = 0.191$; $p = 0.245$). After controlling for gestational age, the correlation between the Tei index and MCA-PSV remained weak and statistically non-significant ($r = 0.184$; $p = 0.268$). Thus, unlike CFI, the Tei index did not demonstrate a linear relationship with the severity of anemia as assessed by Doppler-derived MCA-PSV parameters in this cohort.

Comparison of CFI and the Tei index directly within the study groups likewise revealed no statistically significant correlation. In fetuses with hemolytic anemia, the correlation coefficient was $\rho = -0.102$ ($p = 0.535$), whereas in the control group it was $\rho = -0.175$ ($p = 0.329$). Therefore, despite the statistically significant increase in both parameters in fetuses with hemolytic anemia compared with the control group, the magnitude of the increase in CFI was not directly related to the Tei index value.

Taken together, these findings suggest that CFI and the Tei index characterize different components of fetal cardiovascular adaptation to hemolytic anemia. CFI predominantly reflects cardiac morphometric remodeling associated with increased hemodynamic load and anemia severity, whereas the Tei index characterizes the integrated functional status of the myocardium, the changes in which may be determined by a more complex combination of hemodynamic and compensatory mechanisms.

MCA-PSV MoM demonstrated a statistically significant independent positive association with CFI after adjustment for gestational age and fetal weight ($\beta = 0.427$; $p = 0.009$). Absolute MCA-PSV was also an independent statistically significant predictor of CFI in a separate regression model ($\beta = 0.738$; $p = 0.008$).

Thus, CFI appears to be more directly associated with the magnitude of the hemodynamic response to anemia, whereas the Tei index reflects myocardial functional changes that do not demonstrate a direct relationship with anemia severity as assessed by MCA-PSV MoM.

To identify independent factors associated with changes in the cardiofemoral index, multiple linear regression analysis was performed. The first model included MCA-PSV MoM, gestational age, and fetal weight. The regression model was statistically significant ($R = 0.457$; $R^2 = 0.209$; adjusted $R^2 = 0.141$; $F = 3.080$; $p = 0.040$) and explained 20.9% of the variance in CFI. Among the included predictors, only MCA-PSV MoM demonstrated a statistically significant independent positive association with CFI ($B = 0.085$; $\beta = 0.427$; $t = 2.754$; $p = 0.009$). Gestational age ($\beta = -0.001$; $p = 0.998$) and fetal weight ($\beta = -0.112$; $p = 0.740$) showed no statistically significant independent associations with CFI.

In the second regression model, the absolute MCA-PSV value was used instead of the standardized MoM value, while gestational age and fetal weight were retained as covariates. This model was also statistically significant ($R = 0.463$; $R^2 = 0.215$; adjusted $R^2 = 0.147$; $F = 3.189$; $p = 0.036$) and explained 21.5% of the variance in CFI. Absolute MCA-PSV demonstrated a statistically significant independent positive association with CFI ($B = 0.002$; $\beta = 0.738$; $t = 2.811$; $p = 0.008$). Gestational age ($\beta = -0.694$; $p = 0.076$) and fetal weight ($\beta = -0.116$; $p = 0.731$) were not statistically significant independent predictors of CFI.

Thus, the multivariable analysis confirms an independent association between the magnitude of the hemodynamic response to hemolytic anemia and an increase in CFI. Both MCA-PSV MoM, standardized for gestational age, and absolute MCA-PSV retained statistically significant positive associations with CFI after adjustment for gestational age and fetal weight. The absence of an independent association between CFI and gestational age or fetal weight suggests that the observed increase in relative cardiac dimensions is predominantly related to hemodynamic changes accompanying fetal anemia.

Discussion

The findings of this study confirm the presence of pronounced morphofunctional cardiac adaptation in fetuses with hemolytic anemia. The statistically significant increases in CFI and the Tei index compared with the control group indicate the coexistence of cardiac morphometric remodeling and myocardial functional changes. It is well established that reduced blood oxygen-carrying capacity in anemia is accompanied by a hyperdynamic circulatory response and increased cardiac output, which may lead to cardiac chamber dilatation and cardiomegaly [1,6].

Of particular interest is the positive correlation between CFI and MCA-PSV MoM identified in our study ($\rho = 0.359$; $p = 0.025$). After adjustment for gestational age, the association between absolute MCA-PSV and CFI persisted ($r = 0.426$; $p = 0.008$), while multivariable analysis confirmed an independent association between MCA-PSV MoM and CFI ($\beta = 0.427$; $p = 0.009$). These findings suggest that an increase in relative cardiac dimensions is associated not only with the presence of anemia but also with the magnitude of the fetal hemodynamic response. Thus, CFI may be considered an additional echocardiographic marker of cardiovascular adaptation in fetal anemia.

The increased Tei index observed in fetuses with anemia is consistent with current evidence supporting the potential of MPI for the early detection of myocardial functional abnormalities. Oliveira M. et al. [8] reported that MPI is an integrated parameter combining indices of fetal cardiac systolic and diastolic function and may change in various pathological conditions. In a study of pregnancies complicated by anemia, an increase in fetal MPI was likewise demonstrated compared with controls, accompanied by alterations in parameters of diastolic and longitudinal systolic function.

However, the absence of a statistically significant correlation between CFI and the Tei index ($\rho = -0.102$; $p = 0.535$), as well as between the Tei index and MCA-PSV MoM ($\rho = 0.191$; $p = 0.245$), indicates that these parameters characterize different components of the cardiac adaptive response. CFI predominantly reflects the morphometric response of the heart to increased hemodynamic load, whereas MPI characterizes the global functional status of the myocardium. Therefore, their combined use may provide a more comprehensive assessment of fetal cardiovascular adaptation in hemolytic anemia.

Conclusions

Fetuses with hemolytic anemia demonstrated statistically significant increases in CFI and the Tei index compared with the control group ($p<0.001$). CFI was positively correlated with MCA-PSV MoM ($\rho = 0.359$; $p = 0.025$), and after adjustment for gestational age, a statistically significant association between MCA-PSV and CFI persisted ($r = 0.426$; $p = 0.008$). In the multivariable analysis, MCA-PSV MoM was an independent factor associated with an increase in CFI ($\beta = 0.427$; $p = 0.009$), whereas gestational age and fetal weight had no statistically significant effect. No statistically significant correlation was identified between CFI and the Tei index ($\rho = -0.102$; $p = 0.535$). These findings indicate that CFI may serve as an informative marker of fetal cardiac morphometric adaptation to hemodynamic stress associated with hemolytic anemia, complementing the functional assessment of the myocardium provided by the Tei index.

References

1. Karimov M.M., Normuradova N.M. Ultrasound diagnosis and assessment of fetal cardiac function. Problems of Biology and Medicine. 2025; 6 (166):397-402.

2. Agarwal S., Shastry S., Vasudeva A., et al. National survey of current intrauterine transfusion practices in India: Identifying gaps and actionable recommendations. Vox Sang. 2025; 120: 831–840.

3. van 't Oever R.M., Zwiers C., de Winter D., et al. Identification and management of fetal anemia due to hemolytic disease. Expert Review of Hematology. 2022;15(11):987–998. DOI: 10.1080/17474086.2022.2138853.

4. Макогон А.В., Неверов А.В., Андрюшина И.В. Пиковая систолическая скорость кровотока в средней мозговой артерии и кардио-торакальный индекс в диагностике анемии плода. Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2022; 2: 28-48.

5. Sirivat K., Luewan S., Srisupundit K., et al. Fetal cardiac inflow characteristics in response to fetal anemia: based on fetal hemoglobin Bart's disease at mid-pregnancy. Journal of Ultrasound in Medicine. 2023;42(5):1007–1013. DOI: 10.1002/jum.16109.

6. Anuwutnavin S., Rangseechamrat P., Sompagdee N., et al. Comparing three cardiothoracic ratio measurement techniques and creating multivariable scoring system to predict Bart's hydrops fetalis at 17–22 weeks' gestation. Scientific Reports. 2024;14:8894.

7. Krettli W.S.C., Leite H.V., Cabral A.C.V., et al. Relationship between Cardiofemoral Index and Fetal Blood pH in Fetuses with Rh Alloimmunization. Journal of Community Medicine & Public Health. 2023;7:333. DOI: 10.29011/2577-2228.100333.

8. Oliveira M., Dias J.P., Guedes-Martins L. Fetal cardiac function: myocardial performance index. Current Cardiology Reviews. 2022; 18(4): 20-31.

9. Şimşek A., Köse S. Modified myocardial performance index in fetal growth disturbances as diagnostic and prognostic adjunct. Anatolian Journal of Cardiology. 2023; 27(1):34.

10. Anuwutnavin S., Russameecharoen K., Ruangvutilert P., et al. Evaluation of cardiac findings using speckle-tracking echocardiography in fetuses with hemoglobin Bart's disease. Ultrasound in Obstetrics & Gynecology. 2024;64(6): 755-767.

MORPHOFUNCTIONAL PARAMETERS OF THE FETAL HEART AND FETAL ECHOCARDIOGRAPHY PROTOCOL IN PREGNANCIES COMPLICATED BY MATERNAL GESTATIONAL DIABETES MELLITUS

Usmanova M.
Department of Ultrasound Diagnostics, Center for the Development of Professional Qualifications of Medical Workers, Tashkent, Uzbekistan
Normuradova N.
DSc, Department of Fetal Medicine, Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center for Maternal and Child Health, Tashkent, Uzbekistan
Center for the Development of Professional Qualifications of Medical Workers, Tashkent, Uzbekistan
DOI: 10.5281/zenodo.22091614

Abstract

This article presents a protocol for the echocardiographic assessment of the morphofunctional state of the fetal heart in pregnancies complicated by gestational diabetes mellitus, aimed at the early detection of diabetic cardiomyopathy and prediction of the risk of fetal cardiac dysfunction. Receiver operating characteristic (ROC) analysis identified the following diagnostic cutoff values: cardiofemoral index (CFI) ≥0.66, Tei index ≥0.60, and right ventricular ejection fraction (EF) ≤55.5%. Based on these criteria, an additive scoring system, cardio score, was developed, incorporating three echocardiographic parameters. ROC analysis of the proposed scoring system demonstrated excellent diagnostic performance, with an area under the ROC curve (AUC) of 0.980 (95% CI: 0.954–1.000; p<0.001). The optimal cutoff value was a total score of ≥2 points (ROC-derived mathematical threshold ≥1.5 points), providing a sensitivity of 100%, a specificity of 94.9%, and a Youden index of 0.949. The proposed scoring system enables effective risk stratification of fetal cardiac functional impairment in pregnancies complicated by gestational diabetes mellitus and may be recommended for routine use in prenatal ultrasound diagnostics.

Keywords: fetal echocardiography, Tei index, Simpson's method.

Introduction

Gestational diabetes mellitus (GDM) is one of the most common complications of pregnancy, with its prevalence steadily increasing worldwide due to the growing prevalence of obesity, metabolic syndrome, and diabetes mellitus among women of reproductive age [1,3]. Despite advances in the diagnosis and management of GDM, even with satisfactory glycemic control, the risk of structural and functional alterations in the fetal cardiovascular system persists, primarily due to chronic intrauterine hyperglycemia and hyperinsulinemia [5,6–8]. These changes manifest as myocardial hypertrophy, impaired systolic and diastolic function, and cardiac remodeling and are considered early manifestations of fetal diabetic cardiomyopathy [2,4].

Modern fetal echocardiography enables detailed assessment of fetal cardiac anatomy; however, the early detection of functional abnormalities remains one of the most challenging tasks in prenatal cardiology [2,6]. The most extensively studied echocardiographic parameters of global myocardial function include the Tei index (myocardial performance index, MPI), indices of diastolic filling, and myocardial deformation parameters (strain); in recent years, dual-gate Doppler and speckle-tracking echocardiography have also gained increasing attention [2,5,6]. At the same time, there are no universally accepted algorithms for the comprehensive assessment of the morphofunctional status of the fetal heart that integrate morphometric and functional parameters with diagnostically validated threshold values [2]. Most published studies have focused on individual echocardiographic parameters, predominantly the Tei index, interventricular septal thickness, and myocardial deformation, whereas the integration of multiple parameters into a unified diagnostic risk score remains insufficiently studied [2].

The aim of the study was to develop a protocol and algorithm for echocardiographic assessment of the fetal heart in pregnancies complicated by maternal gestational diabetes mellitus.

Materials and Methods

This study was designed as a single-center, prospective, observational, comparative cohort study based on data from the Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center for Maternal and Child Health conducted during 2025–2026. According to the presence of maternal diabetes mellitus and fetal macrosomia, the participants were divided into three groups. The first, main group comprised 33 pregnant women with GDM and fetal macrosomia; the second, comparison group included 37 pregnant women with fetal macrosomia without GDM; and the third, control group consisted of 34 healthy women without GDM who had physiologic pregnancies and fetuses with normal body weight.

All fetuses of mothers with GDM underwent examination according to a standardized echocardiographic protocol based on the 2023 clinical recommendations of the International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology (ISUOG). The quantitative parameters obtained were subsequently subjected to statistical analysis using parametric or non-parametric methods depending on the distribution of the data. All participants provided written informed consent before undergoing the ultrasound examination.

Statistical analysis was performed using IBM SPSS Statistics version 26. The Shapiro–Wilk test (W

test) was used to assess the normality of data distribution. Multiple linear regression analysis was used to investigate the effects of risk factors on the development of cardiac decompensation. Differences were considered statistically significant at $p<0.05$. ROC analysis was used to determine diagnostic threshold values for CFI, the Tei index, and right ventricular ejection fraction (RVEF), with the optimal cut-off defined by the maximum Youden index. ROC analysis was also performed to assess the predictive performance of the developed scoring system, which incorporated dichotomized values of the Tei index, cardiofemoral index, and ejection fraction.

Results and Discussion

To stratify the risk of diabetes-related cardiac dysfunction, we analyzed the effects of the identified risk factors. Body mass index (BMI) was an independent predictor of the outcome (B = −0.019, β = −0.390, t = −2.438, p = 0.017). The negative regression coefficient indicates that, for each one-unit increase in BMI, the value of the dependent variable decreased by an average of 0.019 units, assuming all other variables in the model remained constant. Based on the magnitude of the standardized regression coefficient (β = −0.390), BMI demonstrated the strongest negative association among all variables included in the model.

Gestational diabetes mellitus was also a statistically significant independent predictor (B = 0.170, β = 0.369, t = 2.133, p = 0.035). The presence of GDM was associated with an average increase of 0.170 units in the dependent variable "Outcome" compared with the absence of GDM after adjustment for BMI, cardiomegaly, and macrosomia. Cardiomegaly did not demonstrate a statistically significant effect on the outcome (B = 0.079, β = 0.181, p = 0.191). Despite the positive direction of the association, the observed difference did not reach statistical significance. Macrosomia was likewise not an independent predictor of the outcome (B = 0.044, β = 0.097, p = 0.422), indicating no independent effect after adjustment for the other factors included in the model.

Thus, according to the multiple linear regression analysis, BMI (β = −0.390, B = −0.019, p = 0.017) and GDM (β = 0.369, B = 0.170, p = 0.035) demonstrated statistically significant independent associations with the studied outcome. These findings support the recommendation that fetal cardiac assessment should be performed in all pregnant women diagnosed with GDM, particularly in those with obesity.

Macrosomia and diabetic fetopathy were observed in the majority of cases during the third trimester of pregnancy. The median gestational age was 33.4 (29.2; 36.3) weeks in the main group and 31.1 (28.4; 35.6) weeks in the comparison group. Therefore, in women with GDM, an initial fetal cardiac assessment is recommended at 32 weeks of gestation, followed by a repeat examination 4 weeks later, at 36 weeks of gestation. In cases of diabetes decompensation, fetal cardiac assessment should be performed every 2 weeks, according to clinical indications.

The fetal echocardiography protocol for pregnancies complicated by maternal GDM should include gray-scale assessment, including measurement of cardiac width, cardiac chamber dimensions, interventricular septal thickness, right and left ventricular myocardial thickness, and calculation of the cardiofemoral index (CFI). The protocol should also include measurement of right and left ventricular volumes—end-diastolic volume (EDV) and end-systolic volume (ESV)—using Simpson's disk method, with calculation of stroke volume, cardiac output, and ejection fraction. As a third step, calculation of the Tei index (myocardial performance index, MPI) using Doppler assessment of transmitral and transaortic flow within a single sampling window is recommended.

Based on the obtained parameters, stratification of the severity of cardiac dysfunction and decompensation is recommended. Analysis of cardiac morphometric parameters demonstrated that CFI was not significantly associated with gestational age (r_s = 0.110, p = 0.267). Gestational age showed a strong positive correlation with fetal cardiac width (r_s = 0.748, p<0.001), interventricular septal thickness (r_s = 0.760, p<0.001), right ventricular myocardial thickness (r_s = 0.751, p<0.001), and left ventricular myocardial thickness (r_s = 0.689, p<0.001).

Spearman correlation analysis demonstrated a strong positive association between gestational age and all fetal cardiac volumetric parameters, including end-diastolic, end-systolic, stroke, and cardiac output volumes of both ventricles (r_s = 0.744–0.849, p<0.001). At the same time, no statistically significant association was identified between gestational age and right ventricular ejection fraction (r_s = −0.046, p = 0.641) or left ventricular ejection fraction (r_s = −0.161, p = 0.102).

No statistically significant correlations were observed between gestational age and IVCT (r_s = −0.049, p = 0.624), ET (r_s = −0.127, p = 0.198), or TCO (r_s = −0.035, p = 0.724). In contrast, a statistically significant positive correlation was identified between gestational age and the Tei index (r_s = 0.232, p = 0.018).

Thus, for stratification of the severity of fetal cardiac dysfunction, CFI, ventricular ejection fraction, and the Tei index were selected as the key parameters, as these indicators demonstrated no clinically significant dependence on gestational age.

For the first stage, a diagnostic threshold was determined for each parameter using ROC analysis, with the optimal cut-off defined by the maximum Youden index. Based on the ROC analysis, the optimal diagnostic threshold for the cardiofemoral index, determined by the maximum Youden index, was 0.665. At this cut-off value, sensitivity reached 100%, specificity was 96.0%, and the Youden index was 0.960, indicating a high diagnostic performance of CFI for predicting cardiac decompensation.

ROC analysis demonstrated high diagnostic performance of the Tei index for detecting abnormalities in fetal cardiac function. The optimal threshold value for the Tei index was ≥0.60, at which sensitivity reached 100%, specificity was 96.0%, and the maximum Youden index was 0.96, indicating a high predictive capacity of this parameter.

According to the ROC analysis, the optimal threshold for right ventricular ejection fraction (RVEF)

was 55.57%. At this cut-off, sensitivity was 76.8%, specificity was 80.0%, and the Youden index was 0.568, indicating a satisfactory diagnostic performance of this parameter for detecting right ventricular functional abnormalities in the fetal heart.

As the second stage, a multivariable binary regression analysis was initially planned to calculate the β-coefficients and determine the number of points to be assigned to each parameter. However, when a multivariable logistic regression model incorporating the dichotomized echocardiographic parameters—the Tei index, cardiofemoral index, and ejection fraction—was constructed, evidence of complete separation was identified. This was manifested by markedly increased standard errors of the regression coefficients and the absence of statistically reliable model parameters. For the Tei index, B = 17.499, OR = 3.97×10^7, $p = 0.994$; for CFI, B = 32.903, OR = 1.95×10^{14}, $p = 0.993$; and for RVEF, B = 16.400, OR = 1.32×10^7, $p = 0.997$.

Therefore, an additive scoring system based on the summation of pathological echocardiographic criteria was used to develop the predictive tool: cardio score = Tei index + CFI + RV EF.

For practical interpretation of the scoring system, a total score of 0–1 point indicates a low probability of fetal cardiac functional abnormalities, whereas a score of ≥2 points indicates a high risk of impaired fetal cardiac function. The cut-off of 1.5 points obtained mathematically corresponds to a transition to the next whole-number score, i.e., ≥2 points.

Thus, to assess the predictive performance of the developed scoring system, which incorporated dichotomized values of the Tei index, cardiofemoral index, and ejection fraction, ROC analysis was performed. The area under the ROC curve (AUC) was 0.980 (95% CI: 0.954–1.000; $p<0.001$), indicating excellent discriminative performance of the scoring system. The optimal threshold was identified at a score ≥1.5 points, corresponding to a sensitivity of 100%, specificity of 94.9%, and a Youden index of 0.949.

Based on these findings, we developed an algorithm for the diagnosis of fetal cardiac dysfunction in pregnancies complicated by maternal gestational diabetes mellitus (GDM).

Stage I. Comprehensive fetal echocardiography and determination of CFI, RVEF, and Tei index At the first stage, the following assessments are performed: 1) Morphometric assessment. In gray-scale ultrasound mode, measurements are obtained of the cardiofemoral index, interventricular septal and ventricular myocardial thicknesses, and cardiac chamber dimensions. 2) Volumetric assessment. Using Simpson's disk method, end-diastolic volume (EDV) and end-systolic volume (ESV) are measured for both ventricles, followed by calculation of stroke volume, cardiac output, and ventricular ejection fraction. 3) Doppler assessment. Using spectral Doppler, simultaneous acquisition of transmitral and transaortic flow is performed within a single sampling window. The relevant time intervals are measured, including isovolumetric relaxation time (IVRT), isovolumetric contraction time (IVCT), and ejection time (ET), followed by calculation of the Tei index.

Stage II. Integrated assessment and calculation of the scoring system

One point is assigned for each of the following criteria: 1) CFI ≥0.66 - 1 point; 2) Tei index ≥0.60 - 1 point; 3) RVEF ≤55.5% - 1 point. The total cardio score is calculated as the sum of the three criteria.

Stage III. Stratification of perinatal risk of fetal cardiac dysfunction. 0-1 point: low probability of functional cardiac abnormalities; ≥2 points: high risk of impaired fetal cardiac function.

Stage IV. Selection of the antenatal management strategy. In cases of a low probability of fetal cardiac functional abnormalities, dynamic echocardiographic monitoring every 2-4 weeks is recommended. In cases of a high risk of fetal cardiac dysfunction, intensification of fetal monitoring and modification of obstetric management may be required, including consideration of early delivery according to clinical indications and postnatal cardiological monitoring of the newborn.

Conclusion

The developed fetal echocardiographic assessment protocol, incorporating integrated evaluation, calculation of an additive scoring system, and stratification of perinatal risk for cardiac dysfunction, enables reliable detection of subclinical structural and functional cardiac abnormalities in fetuses exposed to maternal gestational diabetes mellitus.

Prospective validation of standardized protocols, establishment of reference ranges specific to pregnancies complicated by gestational diabetes mellitus, and longitudinal correlation with postnatal cardiovascular outcomes represent important next steps toward translating these findings into clinical practice.

References

1. Normuradova N.M., Usmanova M.M. Ultrasound assessment of fetal cardiac morphometric parameters in pregnancies complicated by maternal gestational diabetes mellitus. Tibbiyot ta'lim va innovatsion tadqiqotlar. 2026;9(3):21–29.

2. Usmanova M.M., Normuradova N.M. Echocardiographic assessment of fetal cardiac functional parameters in pregnancies complicated by maternal diabetes mellitus. Doktor axborotnomasi. 2025;4(121):116–123.

3. American Diabetes Association. Standards of Care in Diabetes—2025. Diabetes Care. 2025;48(Suppl.1)–S350.

4. Depla A. L., De Wit L., Steenhuis T. J., Slieker M. G., Voormolen D. N., et al. Effect of maternal diabetes on fetal heart function on echocardiography: systematic review and meta-analysis. Ultrasound in obstetrics & gynecology. 2021; 57(4): 539-550.

5. Hou Q., Luo S., Mao F., Dong X., Li X., et al. Exploring the Application of Dual-Gate Doppler Technology in Evaluating the Fetal Cardiac Global Function of Gestational Diabetes Mellitus. Journal of Ultrasound in Medicine. 2026; 45(6): 1181-1190.

6. Huluță I., Apostol L. M., Gana N., Botezatu R., Panaitescu A. M. Alteration in Fetal Cardiac Function at Mid-Gestation Among Pregnancies Subsequently Complicated by Preeclampsia, Fetal Growth

Restriction and Gestational Diabetes Mellitus: A Literature Review. Journal of Clinical Medicine. 2026; 15(5): 1845.

7. Tsokkou S., Konstantinidis I., Keramas A., Anastasiou V., Matsas A., et al. Cardiac Aftermath of Gestational Diabetes—From Intrauterine Impact to Lifelong Complications: A Systematic Review. Journal of Developmental Biology/2025; 13(4): 44.

8. Tsokkou S., Konstantinidis I., Matsas A., Karopoulou E., Papamitsou T. Doppler evaluation of fetal cardiac function in gestational diabetes mellitus: a scoping review providing insights into hemodynamic and structural alterations. Journal of Clinical Medicine. 2025;14(16): 5622.

PHILOLOGICAL SCIENCES

CHARACTERISTICS OF THE USE OF SUBORDINATING CONJUNCTIONS IN VARIOUS TYPES OF SUBORDINATE CLAUSES

Bayramova N.
Azerbaijan University of Languages
PhD Candidate, senior lecturer at the English Grammar department
Baku, Azerbaijan
DOI: 10.5281/zenodo.22091625

Abstract

This article examines the role and functions of conjunctions in modern English, with particular emphasis on subordinating conjunctions and their grammatical and semantic characteristics. It discusses the classification of conjunctions into coordinating and subordinating types and analyzes their role in connecting words, phrases, clauses, and sentences. The research explains how subordinating conjunctions establish logical relationships such as time, cause, condition, purpose, concession, comparison, place, and result within complex sentences. Special attention is given to the syntactic and semantic functions of subordinating conjunctions and their importance in creating cohesion and coherence in spoken and written discourse. The study also examines the sequence of tenses in subordinate clauses and highlights the relationship between tense agreement and sentence meaning in English. Various definitions and theoretical approaches proposed by well-known linguists are reviewed to provide a comprehensive understanding of conjunctions from different linguistic perspectives. The research further emphasizes that mastering the use of subordinating conjunctions contributes to the development of grammatical competence, effective writing, and successful communication in English.

Keywords: conjunction, subordinating, coordinating, syntactic function, main clause, subordinate clause.

Introduction: The words existing in the language are divided into certain groups according to their lexical meanings, morphological features, syntactic functions, characteristics of interaction with other words and basic correction features, which are called parts of speech.

To express a certain and specific idea, the words existing in the language must necessarily interact with each other, be formed in the form of word combinations and sentences. In many cases, to express a more complex and deeper meaning, it is necessary to combine separate word combinations and sentences into a single unit. In this case, several means are used to create a connection between words, word combinations and between separate sentences - word forms, intonation, word order and words belonging to auxiliary parts of speech. One of these auxiliary parts of speech is conjunctions. This study adopts a functional approach to the analysis of English subordinating and coordinating conjunctions viewing grammatical forms in relation to communicative functions they perform. The theoretical foundations of this perspective have been discussed in detail by R. Abdurahmanova who argues the linguistic structures should be interpreted by the roles in conveying meaning within discourse [4]. The present article extends this theoretical discussion by examining how subordinating conjunctions contribute to the semantic and syntactic organization of complex sentences.

A conjunction, which is one of the functional parts of speech, creates a connection between sentence members and sentences, connecting them grammatically. Conjunctions are auxiliary parts of speech that create connections between words, phrases, and sentences. According to their morphological structure conjunctions are divided into simple, derivative, compound and composite. Conjunctions are divided into two groups according to their meanings:

I. Coordinating conjunctions

II. Subordinating conjunctions

Coordinating conjunctions in English are as follows:

- copulative conjunctions (and, both…and, neither…nor, not only);
- adversative conjunctions (but, while whereas);
- disjunctive conjunctions (or, either… or);
- cause-and-effect conjunctions (so, for)

Conjunctions connect two sentences together. The use of conjunctions is essential for the construction of meaningful and fluent sentences in spoken and written language.

Conjunctions are secondary parts of speech that create connections between words, phrases, and sentences. Conjunctions are language elements that create a specific semantic relationship between two or more words, phrases, sentences, or clauses within a larger unit.

In the English language, conjunctions are called “connectives” and “linkers.” Conjunctions are important tools in the organization and cohesion of speech, as they not only build complex units but also guide speakers in interpreting and processing utterances in relation to each other and to the context. As a result, connectives often become discourse markers, and the boundary between the two can sometimes be very thin. Different types of semantic relations can be encoded by conjunctions, from general and basic relations (e.g. conjunction (and), alternation (or), conditionality (if)) to more subtle relations. For example, specific relations, in particular, the concessional contrast (although). It is not uncommon to find multifunctional conjunctions: that is, conjunctions that encode more than one relation (at the same time/whereas). Certain conjunctions encode relations that can be applied to all syntactic levels (usually logical relations, e.g. and), but most can only connect clauses or verb phrases,

since they encode relations between events (e.g. causality).

According to N.A.Kobrina and E.A.Korneeva, a conjunction is a function word that indicates the relationship between two conditional words, phrases, clauses, or sentences. Unlike prepositions, most conjunctions usually retain their specific meaning. Exceptions are conjunctions that can be used in more than one function (that, if, whether, as) [19, p.201].

J.C.Nesfield likens the connection created by conjunctions to the relationship between a "manager and employee" and between "employees." While coordinating conjunctions establish an equal relationship between two "employees," subordinating conjunctions create a relationship between a "manager and an employee" that is, a connection between non-equivalent elements [25, p. 79].

The morphosyntactic properties of conjunctions vary greatly across languages. In English, they are typically characterized by short, fixed morphemes that occur between related elements. However, cross-linguistic analysis shows that conjunctions can consist of both multi-word phrases (e.g., in order to-) and bound morphemes (e.g., Hebrew *ve-* "and" Latin *-que* "this"). They can be repeated before or after each element and can be correlative (e.g., English "either...or"-... or...). Furthermore, conjunctions can be coordinating or subordinating, and can also be grouped for specific syntactic levels, as in languages with different types of conjunctions, such as noun and verb conjunctions.

Certain languages make little use of conjunctions, and intergroup relations are conveyed more through verbal strategies (e.g., colloquialisms and transition-reference marks-intonation). Languages with a written tradition tend to develop a richer set of conjunctions than languages with an oral tradition, because spoken language is characterized by a high degree of parataxis (i.e., a greater lack of conjunctions than written language).

Conjunctions are an important tool in both speech and writing. In fact, conjunctions are one of the most important parts of a sentence and help maintain a strong flow of communication in any language. It should be noted here that the ability to use conjunctions correctly will help a person a lot at this point. Conjunctions add creativity and liveliness to a person's speech as well as writing. This is because conjunctions are characterized by adapting to the meaning of the sentence to which they are attached, as well as adding color to it. *"Connectors help to better understand the use of speech and influence the perception of texts"* [4, p.12].

In the words of E.McClure and M.S.Steffensen, "*connectors act as attention-grabbing and logical clues"* [8, p. 67].

In oral speech, as a means of connecting ideas, these connections can be clarified by context. However, in oral speech and writing, connectors are extremely important. This is because if connectors are not used, the meaning of the sentence is disrupted and the idea expressed is not understood by the listener or reader. Thus, they may understand each sentence or phrase, but they cannot understand the general meaning of the idea. On the contrary, authors who do not use connectors leave their readers to guess the connection between ideas, which makes the comprehension process tedious.

Conjunctions are the structures that help connect two words and two separate sentences together and give the sentences a sense of unity.

By using conjunctions, we can connect two separate sentences that are related to each other, arrange words, and create a sense of unity between two separate sentences. Depending on their meaning and connection, these structures can be added to the beginning, middle, or both sentence at once. Conjunctions, which are called "Conjuctions" in English, are divided into certain classes according to their use.

Since conjunctions are auxiliary parts of speech, they cannot have an independent syntactic function in a sentence. Their main task is to create a connection between words, word combinations, or independent clauses.

As we mentioned above, conjunctions that express subordination and coordination connect the members of the same gender they are connected to and independent clauses in a sentence.

Let's look at some sentences where conjunctions are used:

1. *He looked up and saw her leaving.[3,p.139]*
2. Neither Ali nor his friends were at the party.
3. *People say honesty is the best policy, but we all sometimes bend the truth.[3,p.138]*
4. After she graduates, she will get a job.

The primary function of subordinating conjunctions is to connect a subordinate clause to a main clause. The classification of conjunctions within this group is based on the specific type of subordinate clause they link to the main clause.

Conjunctions establish connections between sentence elements and clauses; they lack lexical meaning, cannot function independently as sentence elements, and do not answer specific questions. Although conjunctions are auxiliary parts of speech—and thus morphological units, they can also be studied as syntactic units due to their function. Because they serve to create syntactic nuances, conjunctions—particularly subordinating ones—are regarded as a syntactic category and are extensively analyzed within the study of syntax.

In general, although conjunctions do not have a special meaning as auxiliary parts of speech, when used in any text, they revive the meaning features inherent in this text within their syntactic function. In other words, the connecting function of the conjunction forms two poles. The first of these poles appears as a grammatical, and the second as a semantic connection. The conjunction acts as a mediator in the formation of the semantic connection of the text. Conjunctions are elements that help to connect two words or two separate sentences and express the integrity of the sentences.

Using conjunctions, we can connect two separate sentences that are related to each other, arrange words, or create a sense of coherence between two separate sentences. They can be added to the beginning, middle, or both sentences, depending on their meaning and relationship.

Generally, conjunctions perform a coordinating function. For this reason, Leung says that conjunctions perform the following functions:

1) To connect two or more words, groups, or clauses, to connect two sentences, especially a main and subordinate clause.

2) And to connect two different words or phrases, dependent or subordinate, to emphasize a concept or its degree.

3) To show that something continues or increases over a period of time. For example: Day by day I am getting better and better.

4) To connect two or more alternatives.

5) Used to give an estimate between numbers. For example: We will stay there a day or two.

6) To offer a comment for correction, provide information for explanation or justification, indicate a contrast, add information, shift the topic of discussion, serve as a condition in conditional expressions, or issue a warning (For example: or, else, etc.) [30, p. 26].

Conjunctions are words used to connect subordinate clauses to the main clauses in the complex. They are used to join independent clauses. As Bas Aarts notes, "another way of expressing this is to say that subordination is a type of hypotaxis. Simply, the part that is used with subordinating conjunctions is called the subordinate part [2, p. 112].

Regardless of how frequently we use them in modern English, keeping the following points in mind will always be helpful:

- Conjunctions can be used at the beginning or in the middle of a sentence, depending on the position of the dependent clause.
- When a subordinating conjunction appears at the beginning of a complex sentence, a comma is placed after the dependent clause.
- When a subordinating conjunction is used in the middle of a sentence, a comma is not required.
- A dependent clause introduced by a conjunction cannot convey meaning on its own, as it lacks logical completeness.

The process of one clause being subordinate to the other in a sentence is called subordination. According to Randolph Quirk and Sidney Greenbaum [24], subordination is asymmetrical. That is, the members are not equal. Also, according to Rodney Huddleston, "*subordination, unlike coordination, involves inequality, that is, the relationship between dependents"* [9, p. 98].

Let's look at some of the subordinating conjunctions used in modern English: After, because, if, that, though, although, till, before, unless, as, when, where, while, than, whether, in order that, nevertheless, etc. Subordinating conjunctions are used within a sentence as follows:

a) He came after I had finished my work.

b) He was sacked from office because of his stance against corruption.

c) I wonder if he will ever change.

d) He thinks that we will agree.

e) Though he is your brother, you should not trouble him like that.

Conjunctions provide clarity and fluency by indicating the semantic meaning or relationship between existing things and by helping us to understand what will follow the sentence. As Mary J. Schleppegrell has pointed out, they do this by creating unity in both speech and texts [17, p. 132].

There are also some cases where a conjunction "stands" between two words, phrases, clauses, or sentences, but is not used to perform a connective function in an unusual way. According to R.Hertwig, B.Benz, and S.Krauss, conjunctions convey broader connections between the situations described in the clauses (words, phrases, sentences, texts) [30,31,32].

Conjunctions play an important semantic role in the sentences they connect. They indicate the type of relationship between the main clause and the dependent clause and therefore can affect the meaning of the sentence. Recent studies have shown that functional grammar provides an effective framework for analyzing linguistic choices across different communicative contexts. For example, R. Abdurahmanova demonstrates how grammatical structures adapt to the communicative demands of the social media discourse within digital culture. The present study extends this line of research by focusing on subordinating conjunctions, investigating how they contribute to the semantic organization and syntactic complexity of English sentences [7].

Subordinating Conjunctions

These conjunctions are used to express the relationship between a main clause and a subordinate clause.

- If the conjunction precedes the main clause, a comma is placed at the end of the main clause, followed by the subordinate clause.
- If it appears after the main clause (i.e., before the subordinate clause), no comma is used.
- Subordinating conjunctions that connect adverbial clauses can be categorized based on manner, cause and effect, time, purpose, and condition.

Let us look at some examples: because, although, as soon as, when, however, just as, even if, by the time, while, in order that, whereas.

Let's look at sentences using subordinating conjunctions:

1. My father believes that I should be a writer.
2. He inspires me always because he believes in me.
3. He works so hard that he can provide everything we need.
4. I trust him because he is a trustworthy person.
5. My life will be blessed if I fulfill his dreams.
6. He will always support me whether I succeed or not.
7. I started writing when I was eight.

In modern English, when conjunctions are studied in a table or in a specific grouping, it can be easier for you to make connections between sentences when describing events. Subordinate clauses are connected to the main clause by means of subordinating conjunctions. From this respect there can be observed mainly the following types of subordinating conjunctions.

1. Conjunctions indicating time:

After

After that

As
As long as
As soon as
Before
By the time
During
Immediately
Meanwhile
No sooner…than
Now
Once
Since
Till
The moment
Then
When
Whenever
While
Until

2. Subordinating conjunctions expressing cause and effect:

As
As a result of
Because
Because of
Consequently
Due to the fact that
Eventually
Finally
For
For that reason
In that case
In the event
On account of
Owing to
Seeing that
Since
So
That's why
Therefore
Thus

3. Conditional subordinating conjunctions:

As if
As long as
As much as
As though
But for
Even if
If
If only
Indeed
In case
In fact that
In the case of
In the event of
Just as
Just in case
On condition that
Providing
Rather than
So as to
So long as
Suppose (that)
Supposing that
Unless
Whereas
Without

4. Subordinating conjunctions indicating place:

As far as
Where
Wherever
To where
From where

5. Subordinating conjunctions expressing concession and contrast:

Although
Though
Despite
Even if
Even though
However
In contrast to
In spite of
In spite of the fact that
Nevertheless
Nonetheless
No matter
Otherwise
Unlike
Whether or not
Notwithstanding that

6. Subordinating conjunctions indicating result:

So that
So….that
Such….that

7.Subordinating conjunctions expressing comparison:

As
Than
As…as
Not so as
As if
As though
The more…the more

8.Subordinating conjunctions expressing purpose:

That
Lest
For the purpose that
In order that
So that

The specificity of the use of tense forms of complete sentences in English is manifested in the rules of tense agreement. In modern English, when the verb in the main clause of complete sentences is in the past tense, the verb in the subordinate clause is also used in one of the past tense forms. In this regard, the following rules should be taken into account in the agreement of tenses in English:

1. When the actions in the main and subordinate clauses are performed simultaneously in the past, the subject of the main clause is used in the Past Indefinite Tense, and the subject of the subordinate clause is used in the Past Indefinite Tense or the Past Continuous Tense. For example: I heard that he was ill. I saw that he was writing a letter.

2. When the action in the subordinate clause occurs before the action in the main clause, the subordinate clause uses the past perfect tense or the past continuous tense. For example: She said that she had seen her. He asked me what I had been doing during my summer holidays.

3. If the action in the subordinate clause occurs before the action in the main clause, at a definite time, the verb in the subordinate clause uses the past indefinite tense. For example: He said that his father was born in 1960.

4. When the action in the subordinate clause is performed after the action in the main clause, the verb in the subordinate clause is used in one of the future tense forms (The Future in the Past Tense or The Future Continuous Perfect in the Past Tense). For example: I felt that she would be happy. He said that he would have come by the time I came back.

A subordinate clause is a part of a sentence that functions independently or as a complete idea. Sentences have a subject (the actor) and a verb (the action that the actor performs). Sentences are made up of independent and dependent clauses that describe a topic, where they are, the mood, and the action they are taking.

A conjunction is a word or phrase that connects a dependent clause to an independent clause. A conjunction is a word or phrase that has informative value to add to the main idea of a sentence, shows a cause-and-effect relationship, or shows time and movement between two parts.

Unlike coordinate conjunctions, subordinate conjunctions include a wide range of conjunctions. The word used to connect an independent clause with a dependent clause in a main clause is called a subordinate conjunction. They help to build complex sentences.

Subordinating conjunctions in English include as long as, because, even if, if, unless, before, since, even, etc. To understand how subordinate conjunctions are used and in what cases, let's look at the following sentences:

• Unless you submit all the supporting documents, your application will not be processed.

• I was not able to go to the hospital because it was raining heavily.

• When I reached the railway station, I found out that the train had already left.

• Although we had parked in the parking lot, the traffic police issued us a parking ticket.

• It is better to keep everything packed as you are not sure when you would be asked to come to Bangalore.

Subordinate clauses, also known as dependent clauses, are sentence parts that contain a subject and a verb but act as modifiers of the subject of an independent clause. This part of a sentence can help to establish temporal sequence, causality, or a specific instance of an idea. Main clauses are usually joined to an independent clause (or main clause) by subordinating conjunctions to form complex sentences or to clarify the intent or meaning of the sentence. Branch clauses fall into three categories: direct object, noun-based, or verb-based. There are three types of branch clauses:

1. Subordinate clauses: A subordinate clause in a sentence is a subordinate clause. Subordinate clauses contain both a subject and a verb and usually function as direct objects or predicate nominatives.

2. Complement clauses: An adjective clause, also known as a relative clause or a relative clause, is a type of subordinate (branch) clause that provides additional information in a sentence. They are used in a main or independent clause to modify a noun or noun phrase. A complement clause is always a dependent clause, meaning it contains its subject and a verb and is not a complete sentence. Complement clauses are usually used in a sentence with a relative pronoun (such as “who,” “whom,” “which,” “whose,” or “that”) or a relative adverb (“when,” “where,” or “why”).

3. Adverbial clauses: Relative adverbs such as “where”, “when” and “why” provide additional information about place, time or reason. They function by modifying other parts of speech in a sentence. When a relative adverb begins an adjective clause, it modifies the noun or noun phrase. When a relative adverb begins an adverbial clause, it modifies the verb.

Compound sentences with a subjunctive are divided into three types: predicate clauses, complement clauses and adverbial clauses.

While subordinate clauses can take the place of any noun in a sentence, complement and adverbial clauses modify words in a sentence rather than replacing them. Subordinate clauses are dependent clauses that can replace subjects, objects, or subject complements in sentences. These clauses begin with either interrogative pronouns or declarative words.

Let's look at an example:

Rafiki encouraged Simba to remember who he was [24].

In this sentence, the main clause, “who he was,” acts as the indirect object of the verb, “encouraged.”

Complementary clauses are dependent clauses that modify the noun in the main clause or provide more information. For example: The lime green suit that I bought in Paris looks stunning on him. (The lime green suit that I bought in Paris looks stunning on him.) In this sentence, the relative clause that I bought in Paris (-that I bought in Paris) modifies the subject, the suit, by identifying which suit the speaker is referring to.

It is very easy to understand the function and usage of subordinating conjunctions. Because it is a conjunction used only to show the cause-and-effect relationship between the subordinate clause and the main clause.

According to the Oxford Learner's Dictionary, a subordinating conjunction is defined as "a word that begins a subordinate clause (such as although or because)". The Macmillan Dictionary provides a more detailed definition of subordinating conjunctions [30]. According to it, a subordinating conjunction is a conjunction such as "because", "while", "although" or "in the event" that begins a subordinate clause and connects it to an independent clause or another unit in the sentence. For example, in the sentence 'I declined to comment because I did not have all the facts', 'because' is a subordinating conjunction. The Collins Dictionary defines a subordinating conjunction as "a word such as 'although', 'because' or 'when' that begins a subordinate

clause" [31], and according to the Merriam-Webster Dictionary, a subordinating conjunction is "a conjunction that joins together a single word. A clause that does not have a main clause and does not form a complete sentence by itself" [30].

The use of Subordinating Conjunctions in Adverbial Clauses

An adverbial clause is a dependent clause that modifies the main verb in an independent clause. An adverbial clause always begins with a subordinating conjunction and must be attached to the independent clause to make sense. For example: Even if I take the train, I still might be late to my appointment. (Even if I take the train, I still might be late to my appointment.)

An adverbial clause modifies the main verb of an independent clause by answering one of four questions: when? (where), when? (when), how? (how), and why? (why). Below are examples of specific subordinating conjunctions used to answer each question in the adverbial clause:

1. Adverbial clauses that answer the question - **Where?**

Where and Wherever are subordinating conjunctions that can be used at the beginning of dependent clauses to answer the question of where. For example: Wherever Mary went, the lamb was sure to go.

In this example, the adverbial part gives us the location of Mary's lost lamb.

2. Adverbial clauses that answer the question - **When?**

Subordinating conjunctions such as after, as soon as, before, now that, once, till, until and while begin the adverbial clause and change the message by showing when the action of the independent clause occurs. For example: You may have dessert as soon as you finish your dinner.

In the above sentence, the adverbial part allows us to know the time frame in which

3. Adverbial clauses that answer the question- **How?**

An adverbial clause can also begin with subordinating conjunctions that answer the question How?, and some of these conjunctions are as, as far as, in so far as, in that, that, as even, in so far as, in that, not, as how, etc. Often, these types of conjunctions express some kind of condition on the verb, as if the action of the sentence depends on what is stated in the dependent clause. For example: I will watch that movie with you as long as you promise that I will not get bored. In this sentence, the speaker agrees to the action of "watching a movie" as long as it is not a boring movie.

4. Adverbial clauses that answer the question - **Why?**

Finally, adverbial clauses can also express why the action of the sentence occurs, and these sentences do this by using one of the following subordinating conjunctions: because, even if, even though, in case that, since, so that, why. For example: Since I trust you to take care of it, we will adopt a dog today. The adverbial part of the given sentence explains why the speaker chose to get the dog.

Additional notes on the topic:

1) Adverbial clauses always begin with a subordinating conjunction. For example:

Although I may never reach the top, I will still attempt to climb Mount Everest.

In the example above, the dependent adverbial clause expresses a condition on which the action of the sentence (climbing Everest) is dependent.

2) Adverbial clauses always modify verbs. For example:

She stepped confidently across the tightrope as if she had done it many times before.

In the sentence above, the adverbial part modifies the verb to walk by describing "how" the subject's rope is being walked.

3) Adverbial clauses that come before the subject must be separated from the rest of the sentence by a comma. For example:

Even though I have never tried a funnel cake before, I think I would like it.

I think I would like a funnel cake even though I have never tried one before.

In the two examples above, a similar adverbial clause both begins and ends with two different sentences. In the first example, a comma should be used to separate the adverbial clause from the rest of the sentence. The authors do this to direct the reader's attention to the subject of the sentence, as well as to indicate that the adverbial clause is an introduction to the most important part of the sentence.

The subordinating conjunctions after, as soon as, before, now that, once, till, until, and while are used in adverbial clauses and are related to the verb by indicating when the action of the independent clause occurs. They connect the main clause and the subordinate clause by expressing the action. For example: You may have dessert as soon as you finish your dinner.

Although I may never reach the top, I will still attempt to climb Mount Everest.

In this example, the adverbial clause is dependent on the main clause. The clause used with the conjunction is the clause, and the other clause is the main clause. In some cases, the clause can even come before the main clause.

Subordinating conjunctions and linking adverbs have very little in common because of their place of use. In other words, they are used in independent clauses to connect sentences together. Subordinating conjunctions in English are used in adverbial clauses according to their meanings. That is, in adverbial clauses, conjunctions belong to the verb, connect the subject and the message with each other.

In English, temporal relations between clauses can be considered as their semantic relations. Here, mainly, conjunctions that indicate time are meant. In English, temporal relations are determined by the previous time. The conjunctions Until, till and before indicating that the situation in the clause occurred before.

Although subordinating conjunctions are traditionally described as grammatical markers of close dependency, they also contribute to the conceptual organization of meaning by establishing temporal causal conditional, and consessive relations between events. This

cognitive semantic perspective is consistent with principles of Frame Semantics and Cognitive Grammar discussed in R. Abdurahmanova, where linguistics meaning is interpreted through conceptual structures and frames. Within Cognitive Grammar and Frame Semantics, grammatical elements are viewed as cues that activate conceptual structures rather than merely formal devices. R.Abdurahmanova argued that linguistic categories are understood through frames and conceptual relationships [5]. From this perspective subordinating conjunctions may be analyzed not only as syntactic connectors but also as linguistic units that evoke specific semantic relations between clauses.

Conclusion: Conjunctions are very important in English, and this is the main reason why time is devoted to their study in linguistics. This article has tried to present them in a comprehensive manner, with special attention to their types of meaning, use or function in the language. We have mentioned many, but simple, sentence examples to make them understandable and easy to understand. The advantage of this article is that it has tried to provide the reader with basic information.

Conjunctions create connections between sentence members and sentences, do not have lexical meaning, cannot be used as separate sentence members, and do not answer an independent question. Conjunctions, as auxiliary parts of speech, although they are morphological language units, can be studied functionally as syntactic units. Conjunctions, especially subordinating conjunctions, are considered as a syntactic category because they serve to create syntactic nuances and are widely analyzed in syntax.

In general, although conjunctions do not have a special meaning as auxiliary parts of speech, when used in any text, they revive the meaning features inherent in this text within their syntactic function.

In other words, the connective function of a conjunction forms two poles. The first of these poles appears as a grammatical, and the second as a semantic connection. The conjunction acts as a mediator in the formation of the semantic connection of the text.

This article has examined the role and functions of conjunctions in English, with particular emphasis on subordinating conjunctions and their contribution to sentence structure and meaning. The analysis has shown that conjunctions are essential grammatical elements that connect words, phrases, clauses, and sentences, ensuring coherence and logical relationships in both spoken and written discourse. Subordinating conjunctions play a significant role in forming complex sentences by linking dependent clauses to independent clauses and expressing relationships such as time, cause, condition, purpose, comparison, concession, and result. The study has also demonstrated that the correct use of subordinating conjunctions contributes to grammatical accuracy, semantic clarity, and effective communication. Furthermore, the research has highlighted the importance of sequence of tenses in subordinate clauses, showing how tense agreement helps maintain temporal consistency within complex sentences. The theoretical views of various linguists confirm that conjunctions are not only grammatical connectors but also important devices for expressing logical and semantic relations. The examples discussed throughout this research illustrate the practical use of subordinating conjunctions in modern English and emphasize their role in improving language proficiency. Understanding the functions and classifications of conjunctions enables learners to produce more accurate, coherent, and natural English speech and writing. Therefore, the study of subordinating conjunctions remains an important area of English grammar and syntax, contributing to both linguistic theory and language teaching.

References

1. Aarts B. (2001). English syntax and argumentation. 2nd ed. New York: Palgrave.

2. Abdullayev A. S., Seyidov Y. M., Hasanov A. Y. (1972). Muasir Azerbaycan dili: Sintaksis.

3. Abdurahmanova R. G. (2024). English conjunctions in practice. Baku: Elm ve Tehsil, p.256.

4. Abdurahmanova R. G. (2025). Functional approach in linguistics: Theoretical foundations. Filologiya meseleleri, 1, 99–107. Baku: Elm ve Tehsil.

5. Abdurahmanova R. G. (2026a). Frames, concepts, and categorization in cognitive grammar: With reference to frame semantics. Elmi Xeberler. Humanitar Elmler Seriyasi, 1, 2026, p.89–95.

6. Abdurahmanova R. G. (2026). Functional transformation of language in the context of digital culture: An analysis of social media discourse within the framework of functional grammar. International Scientific and Practical Conference, Tashkent, Uzbekistan State World Languages University. p. 37–41.

7. Asadova M. N. (2007). Ingilis ve Azerbaycan dillerinde tamamliq budaq cumleleri. Baku: Nurlan.p.146

8. Axundov A. A. (1961). Feilin zamanlari. Baku: ADU.

9. Azerbaycan dilinde zaman budaq cumlelerinde sintaktik derivasiya. (2013). Azerbaycanshunasligin aktual problemleri. IV International Scientific Conference dedicated to the 90th anniversary of Heydar Aliyev, Baku, May 1–4, 204–205.

10. Baskervill W. M., Sewell J. W. (1896). An English grammar. Retrieved from http://classiclit.about.com/library. Accessed August 1, 2015.

11. Block M. Y. (1983). A course in theoretical English grammar. Moscow.p.316.

12. Burton-Roberts N. (2011). Analysing sentences: An introduction to English syntax. 3rd ed. London: Pearson Education Limited.

13. Dilchilikde murekkeb cumle ve zaman budaq cumlesinin turkoloji aspektde tedqiqi. (2020). Humanitar ve ictimai elmlerin esaslari movzusunda II Respublika elmi konfransinin materiallari, 49–51. Baku, December 22.

14. Eckhard-Black C., Whittle Cassell R. (1992). A handbook of grammar, current usage and word power. Cassell Language Guides. British Library Cataloguing-in-Publication Data.

15. Huseynov A. (2015). Ingilis dilinin nezeri qrammatikasi uzre muhazireler toplusu. Baku: Mutercim.

16. Ilyish B. A. (1971). The structure of modern English grammar. Leningrad: Prosvescheniye.

17. Ingilis ve Azerbaycan dillerinde zaman budaq cumlesi ile feil terkiblerinin sinonimliyi. (2017). Filologiya meseleleri, 4, 46–51. Baku.

18. Kazimov G. Sh. (2008). Muasir Azerbaycan dili. IV hisse. Sintaksis. Baku: Nurlan. 500p.

19. Kobrina N. A., Kornayeva E. A. (1999). An outline of modern English.346p.

20. Leech G., Svartvik J. (1994). A communicative grammar of English. 3rd ed. London: Longman.

21. McArthur T. (1996). The Oxford companion to the English language. Oxford: Oxford University Press.

22. Musayev O. (1979). Ingilis dilinin qrammatikasi. Ed. Z. N. Verdiyeva. Baku: Maarif. 359p.

23. Musayev O. (1986). Ingilis dilinin qrammatikasi. Baku: Maarif.368p.

24. Musayev O. (1996). Ingilis dilinin qrammatikasi. Baku: Maarif. 392p.

25. Nesfield J. C. (1905). Outline of English grammar.353p.

26. Qloballashan dunyada ingilis dilinin inkaredilmez rolu. (2012). Tetbiqi dilchiliyin aktual problemleri. International Scientific Conference, Baku, November 27–28, 135–137.

27. Valiyeva N. (2011). Dil tipologiyasinin aktual problemleri / Actual problems of language typology / Aktualnye problemy yazykovoy tipologii. Baku: Elm ve Tehsil. 509p.

28. Veyselli F. (2005). Struktur dilchiliyin esaslari. Studia Philologica I. Baku: Tehsil Neshr.

29. Vikulova E.A. (2014). Teoreticheskaya grammatika sovremennogo angliyskogo yazyka. Yekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo Universiteta.

30. http://flesl.net/Grammar/complex_sentences.pdf

31. https://blog.azeringilisce.com/ingilis-dilind%C9%99-baglayicilar/

32. https://www.oxfordbibliographies.com/display/document/obo-9780199772810/obo-9780199772810-0207.xml#backToTop

33. https://dictionary.cambridge.org/grammar/british-grammar/conjunctions-causes-reasons-results-and-purpose

34. https://academicguides.waldenu.edu/writingcenter/grammar/conjunctions

PHYSICS AND MATHEMATICS

GEOMETRIC AND HYDRODYNAMIC MODEL OF A UNIFIED ELLIPSOIDAL VORTEX WITH A CENTRAL CONCAVE KERN AND PRESERVED FILAMENT CHIRALITY

Milyuvene V.,
Milyus A.,
Milyute E.
IRG "LITAVEM-3"
Vilnius, Lithuania
DOI: 10.5281/zenodo.22091644

Abstract

A geometric and hydrodynamic model of a unified ellipsoidal vortex of the first kind is proposed, in which the central structural element is a concave helical kern embedded in the northern hemisphere of the vortex and having the form of a narrowing rotating funnel. A conical helical coordinate system adapted to the geometry of the kern is introduced, and a parametrization of the kern together with a continuous family of helical material filaments is constructed. Conditions for the tangential continuation of these filaments through the central outlet and for the subsequent formation of a quasi-meridional outer shell are formulated. Three distinct notions of filament chirality are introduced: geometric chirality associated with the spatial trajectory, spin chirality determined by the sign of the material circulation, and dynamic chirality defined through the local helicity density. The oriented microvortex circulation vector $\boldsymbol{\mu} = \Gamma\,\mathbf{T}$ [1] is introduced as a local characteristic of the rotational state of a filament. A regularized sink–vortex model with nonzero circulation is developed to describe the local formation of the concave kern, and the resulting logarithmic-spiral transport is related directly to the helical winding density. In particular, the relation $\operatorname{sgn} q_K = \operatorname{sgn} G = \operatorname{sgn} \Gamma = \chi_{\text{spin}}$ establishes the consistency between the geometric winding and the orientation of the material circulation. It is shown that, under the imposed continuity and circulation-preservation conditions, the kern and the outer quasi-meridional shell form a single continuous material transport system in which the sign of the filament circulation, and hence the spin chirality, is preserved throughout the transport cycle.

Keywords: ellipsoidal vortex; concave helical kern; vortex filament; conical helical coordinates; filament chirality; circulation vector; helicity; sink–vortex flow; logarithmic spiral; material transport; quasi-meridional vortex shell; incompressible flow.

1. Problem Formulation and the Conical Helical Coordinate System.

A mathematical model of a unified ellipsoidal microvortex formed after a localized impulsive disturbance is considered. The central structural element of the vortex, hereafter referred to as the kern, is a concave helical transport region embedded in the northern hemisphere of the ellipsoidal vortex and having the shape of a rotating funnel.

Within the kern, matter moves along helical material filaments associated with a family of local cross-sectional layers. As the filaments advance toward the centre of the vortex, they converge toward the outlet cross-section of the kern, after which they pass tangentially into the outer region of the ellipsoidal vortex and subsequently form its quasi-meridional helical shell [1-3, 6-7].

Instead of the standard cylindrical coordinates (ρ, φ, z), we introduce a curvilinear conical helical coordinate system (s, η, ψ), where s is a longitudinal parameter measured along the meridional generatrix of the kern, η is the normalized radial coordinate of a local cross-section, and ψ is the azimuthal phase. The coordinate ranges are

$$0 \le s \le L_K, 0 \le \eta \le 1, 0 \le \psi < 2\pi\,, \qquad (1)$$

where L_K is the longitudinal length of the kern with respect to the parameter s. The geometry of the kern is determined by two smooth functions, $R_K(s), Z_K(s)$, which describe the meridional profile. Here, $R_K(s) > 0$ is the radius of the local circular cross-section of the kern, while $Z_K(s)$ is its axial coordinate. A point inside the kern is represented by

$$x = \eta\, R_K(s)\cos\psi\,,\ y = \eta\, R_K(s)\sin\psi\,,\ z = Z_K(s), \qquad (2)$$

or, in vector form,

$$\mathbf{X}_K(s,\eta,\psi) = \big(\eta\, R_K(s)\cos\psi\,,\ \eta\, R_K(s)\sin\psi\,,\ Z_K(s)\big)\,. \qquad (3)$$

The lateral surface of the kern corresponds to $\eta = 1$, and therefore has the parametrization

$$\mathbf{X}_K(s,\psi) = \big(R_K(s)\cos\psi\,, R_K(s)\sin\psi\,,\ Z_K(s)\big)\,. \qquad (4)$$

For the chosen orientation of the longitudinal parameter s,

$$R_K'(s) < 0\,,\ Z_K'(s) < 0\,, \qquad (5)$$

which means that, when moving from the northern inlet toward the outlet, both the radius of the kern and its axial coordinate decrease monotonically.

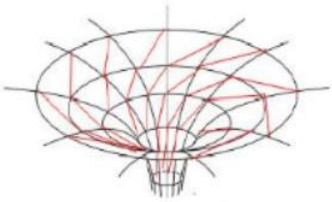

Fig. 1. Geometry of the concave helical kern in the northern region of the ellipsoidal vortex. (North pole) [5].

The local inclination angle of the meridional generatrix with respect to the Oz-axis denoted by $\theta(s)$. It is not introduced as an independent coordinate but is

completely determined by the geometry of the meridional profile:

$$\tan\theta(s) = \left|\frac{R_K'(s)}{Z_K'(s)}\right|. \quad (6)$$

or equivalently,

$$\theta(s) = \arctan|R_K'(s)/Z_K'(s)|. \quad (7)$$

Thus, $\theta(s)$ characterizes the local opening angle of the funnel and varies continuously along the kern.

The coordinate system (s, η, ψ) is therefore naturally adapted to the geometry of the concave helical kern and provides a convenient framework for describing the transport of matter along helical vortex filaments, their convergence toward the outlet section of the kern, and their subsequent transition into the outer ellipsoidal shell.

1.1. Helical Structure of the Filaments.

For a concave meridional profile, the function $\theta(s)$ varies along the kern, reflecting the gradual change in the inclination of its wall. The helical structure is introduced by allowing the azimuthal phase of each material filament to vary with the longitudinal coordinate s. Let α denote the initial phase of an individual filament,

$$0 \le \alpha < 2\pi. \quad (8)$$

The helical phase of the filament is defined by

$$\Psi_\alpha(s) = \alpha + \int_0^s q_K(\xi)\, d\xi. \quad (9)$$

Here $q_K(s)$ is the local helical winding density. Consequently,

$$q_K(s) = d\Psi_\alpha(s)/ds \quad (10)$$

and its sign determines the local direction of helical winding. Each material filament on the lateral surface $\eta = 1$ of the kern is represented by the spatial curve

$$\mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha}(s) = \big(R_K(s)\cos\Psi_\alpha(s),\ R_K(s)\sin\Psi_\alpha(s),\ Z_K(s)\big). \quad (11)$$

with $0 \le s \le L_K$.

Differentiating (11) with respect to s, we obtain

$$\frac{d\mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha}}{ds} = \begin{pmatrix} R_K'(s)\cos\psi_\alpha - R_K(s)q_K(s)\sin\psi_\alpha \\ R_K'(s)\sin\psi_\alpha + R_K(s)q_K(s)\cos\psi_\alpha \\ Z_K'(s) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Its magnitude is

$$\lambda_K(s) = \left|d\mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha}/ds\right| = \sqrt{|R_K'(s)|^2 + R_K^2(s)q_K^2(s) + |Z_K'(s)|^2} \quad (13)$$

and hence the unit tangent vector is

$$\mathbf{T}_{K,\alpha}(s) = (1/\lambda_K(s))\big(d\mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha}/ds\big). \quad (14)$$

The quantity $q_K(s)$ (10) characterizes the rate at which the filament rotates around the kern axis per unit longitudinal parameter. Its magnitude $|q_K(s)|$ determines the local winding density, whereas $\operatorname{sgn} q_K(s)$ determines the local sense of helical winding. For a kern possessing a single helical orientation, we assume $q_K(s) \neq 0$ throughout the kern and

$$q_K(s_1)\, q_K(s_2) > 0, s_1, s_2 \in [0, L_K] \quad (15)$$

so that the sign of the helical winding does not change along the kern.

1.2. Domain of the Kern.

Using the same coordinate system (s, η, ψ), the three-dimensional kern is defined by

$$K = \{\mathbf{X}_K(s,\eta,\psi):\ 0 \le s \le L_K, 0 \le \eta \le 1, 0 \le \psi < 2\pi\}, \quad (16)$$

where

$$\mathbf{X}_K(s,\eta,\psi) = \big(\eta R_K(s)\cos\psi, \eta R_K(s)\sin\psi, Z_K(s)\big). \quad (17)$$

For each fixed value $s = s_0$, the variables (η, ψ) describe a circular cross-section of the kern:

$$D_K(s_0) = \{(x,y,z): x^2 + y^2 \le R_K^2(s_0), z = Z_K(s_0)\}. \quad (18)$$

The lateral boundary of the kern is

$$\partial K_{\text{lat}} = \{\mathbf{X}_K(s,1,\psi):\ 0 \le s \le L_K, 0 \le \psi < 2\pi\}. \quad (19)$$

The northern inlet cross-section is

$$S_{\text{in}} = \{\mathbf{X}_K(0,\eta,\psi):\ 0 \le \eta \le 1,\ 0 \le \psi < 2\pi\}, \quad (20)$$

whereas the central outlet cross-section is

$$S_{\text{out}} = \{\mathbf{X}_K(L_K,\eta,\psi):\ 0 \le \eta \le 1,\ 0 \le \psi < 2\pi\}. \quad (21)$$

Thus, the entire kern can be represented as the union of its local cross-sections,

$$K = \bigcup_{0 \le s \le L_K} D_K(s). \quad (22)$$

Associated with the curvilinear parametrization $\mathbf{X}_K(s,\eta,\psi)$, we introduce a local orthonormal frame $(\mathbf{e}_s, \mathbf{e}_\eta, \mathbf{e}_\psi)$. Here $\mathbf{e}_s$ is oriented along the longitudinal direction of the kern, $\mathbf{e}_\eta$ is directed across the local cross-section, and $\mathbf{e}_\psi$ represents the local azimuthal direction.

In this frame, the velocity field is represented as

$$\mathbf{v} = v_s\mathbf{e}_s + v_\eta\mathbf{e}_\eta + v_\psi\mathbf{e}_\psi, \quad (23)$$

the vorticity field as

$$\boldsymbol{\omega} = \omega_s\mathbf{e}_s + \omega_\eta\mathbf{e}_\eta + \omega_\psi\mathbf{e}_\psi \quad (24)$$

and the vector vortical potential as

$$\mathbf{A} = A_s\mathbf{e}_s + A_\eta\mathbf{e}_\eta + A_\psi\mathbf{e}_\psi. \quad (25)$$

The helical material filaments are continuous curves embedded in this coordinate structure. Their geometry is determined jointly by the narrowing functions $R_K(s), Z_K(s)$, and by the helical phase $\Psi_\alpha(s)$. The same coordinate description will subsequently be employed to formulate the internal flow, the formation of the concave kern, and the transport of material filaments toward its outlet.

At the outlet, the material filaments do not terminate. Instead, they pass continuously into the outer region of the vortex. The geometric matching between an internal helical filament and its outer continuation requires, at minimum, continuity of position,

$$\mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha}(L_K) = \mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha}(0), \quad (26)$$

and continuity of the tangential direction,

$$\mathbf{T}_{K,\alpha}(L_K) = \mathbf{T}_{S,\alpha}(0). \quad (27)$$

The mechanism of this transition and the subsequent formation of the quasi-meridional outer shell are considered in the following section.

2. Geometric Model of the Concave Helical Kern.

The central structural element of the ellipsoidal vortex of the first kind is a concave helical kern embedded within its northern hemisphere and having the form of a rotating funnel (Figs. 1 and 2). Its lateral surface is a smooth concave surface that narrows continuously from a wide northern inlet toward an outlet cross-section located near the central region of the vortex. The kern is not regarded as an independent vortex structure but as an integral part of a single continuous material transport system that directs matter from the northern region toward the central part of the vortex.

The geometry of the kern is determined by the meridional functions $R_K(s)$ and $Z_K(s)$, introduced in Section 1, whereas the helical organization of its material filaments is determined by the phase function $\psi_\alpha(s)$ from Eq.(9) and by the corresponding filament parametrization

$$\mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha}(s) = \big(R_K(s)\cos\psi_\alpha(s), R_K(s)\sin\psi_\alpha(s), Z_K(s)\big). \quad (28)$$

Thus, the geometry of an individual filament is determined by two mutually coupled effects: the meridional narrowing of the kern, described by $R_K(s)$ and $Z_K(s)$, and the azimuthal winding, described by $q_K(s)$.

The motion of matter inside the kern follows the helical organization of these material filaments. In the local orthonormal frame $(\mathbf{e}_s, \mathbf{e}_\eta, \mathbf{e}_\psi)$, introduced in Section 1, the velocity field is represented as

$$\mathbf{v} = v_s\mathbf{e}_s + v_\eta\mathbf{e}_\eta + v_\psi\mathbf{e}_\psi\,. \quad (29)$$

Here v_s is the longitudinal component responsible for the transport of matter from the northern inlet toward the central outlet, $v_s > 0$, when $\mathbf{e}_s$ is oriented in the direction of the material transport.

The component v_ψ is the azimuthal velocity and describes rotation of matter about the local axis of the kern. Its sign determines the local sense of circulation. In particular, for a single-chirality kern,

$$\operatorname{sgn} v_\psi = \text{const} \quad (30)$$

along each regular filament.

The component v_η describes transverse redistribution of matter across the local cross-section of the kern. Because the kern narrows toward its outlet,

$$R_K'(s) < 0,$$

a nonzero transverse component may in general be required to maintain a continuous incompressible transport through cross-sections of varying radius. Thus, v_η should not be interpreted as an additional independent helical motion but as a component associated with the spatial redistribution of matter within the narrowing geometry.

For a material trajectory that follows a filament exactly, the velocity vector is tangent to that filament. Therefore, $\mathbf{v} \parallel \mathbf{T}_{K,\alpha}$, or equivalently,

$$\mathbf{v} = V_{K,\alpha}(s,t), \mathbf{T}_{K,\alpha}(s) \quad (31)$$

where $V_{K,\alpha}(s,t) > 0$ is the local transport speed along the filament.

Using the parametrization (11), the tangent vector is proportional to

$$\frac{d\mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha}}{ds} = R_K'(s)\mathbf{e}_\rho + R_K(s)q_K(s)\mathbf{e}_\psi + Z_K'(s)\mathbf{e}_z. \quad (32)$$

Consequently, the azimuthal-to-meridional contribution to the filament direction is determined directly by the winding density $q_K(s)$. In particular, increasing $|q_K(s)|$ increases the azimuthal contribution to the local tangent direction.

Upon reaching the outlet cross-section S_{out}, a material filament neither terminates nor reflects. Instead, it passes continuously from the kern into the outer region of the ellipsoidal vortex. Let the continuation of the α-th filament in the outer region be denoted by $\mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha}(u), u \geq 0$, where $u = 0$ corresponds to the point at which the filament leaves the kern.

Continuity of the material filament requires positional matching,

$$\mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha}(0) = \mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha}(L_K). \quad (33)$$

Tangential passage from the kern into the outer region additionally requires

$$\mathbf{T}_{S,\alpha}(0) = \mathbf{T}_{K,\alpha}(L_K). \quad (34)$$

Equivalently, if non-normalized tangent vectors are used, the weaker geometric condition is

$$\frac{d\mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha}}{du}(0) \parallel \frac{d\mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha}}{ds}(L_K) \quad (35)$$

This condition is sufficient for a C^1-smooth geometric continuation after an appropriate choice of parametrization.

Beyond the outlet, the filament is no longer constrained by the funnel geometry. Its trajectory is instead determined by the velocity field in the outer region of the ellipsoidal vortex. The global rotational component of this field gradually changes the orientation of the initially tangentially emerging filament and transforms its continuation into a quasi-meridional helical trajectory.

The helical winding density in the outer region may therefore differ from its value inside the kern. If $q_S(u)$ denotes the corresponding winding density of the outer continuation, a gradual decrease in winding may be represented by $|q_S(u)| < |q_K(L_K)|$. However, for a vortex of the first kind possessing a single chirality, reversal of the helical orientation is excluded. Therefore, $q_S(u)\, q_K(L_K) > 0$. Thus, the magnitude of the helical winding may decrease after the filament leaves the kern, whereas its orientation is preserved.

Under the circulation-conservation assumptions introduced in the hydrodynamic part of the model, the circulation carried by a material filament is continuous across the outlet:

$$\Gamma_{S,\alpha}(0) = \Gamma_{K,\alpha}(L_K). \quad (36)$$

Likewise, if the intrinsic spin orientation of a filament is represented by the spin vector $\mathbf{S}_\alpha$, the model of a unified vortex requires preservation of its orientation during the transition from the kern to the outer region,

$$\operatorname{sgn}(\mathbf{S}_\alpha \cdot \mathbf{T}_\alpha) = \text{const}. \quad (37)$$

The ensemble of outer continuations $\{\mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha}(u)\}_{\alpha\in[0,2\pi)}$ forms the quasi-meridional outer shell of the vortex. Consequently, this shell is not introduced as an independent family of material curves. It is generated by the same continuous material filaments that enter the concave kern through its northern region, converge toward the outlet, pass tangentially into the outer vortex region, and subsequently evolve under the global rotational velocity field.

The complete material trajectory of the α-th filament may therefore be represented schematically as

$$\mathbf{\Upsilon}_\alpha = \mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha} \cup \mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha} \quad (38)$$

subject to the matching conditions

$$\mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha}(L_K) = \mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha}(0), \quad (39)$$
$$\mathbf{T}_{K,\alpha}(L_K) = \mathbf{T}_{S,\alpha}(0).$$

Thus, the concave kern constitutes a helical material transport region that guides matter from the wide northern inlet toward the central outlet and determines the position, winding density, and tangential orientation of the filaments at their transition into the outer region. The subsequent formation of the quasi-meridional outer shell is governed by the outer velocity field associated with the global rotation of the ellipsoidal vortex. The kern and the outer shell therefore represent two geometrically distinct regions of a single continuous material-filament system.

3. Geometry of the Ellipsoidal Vortex of the First Kind.

3.1. Geometry of the Outer Region.

The ellipsoidal vortex of the first kind is considered as a bounded vortex-filled domain containing a

single concave helical kern. The outer vortex domain is defined by

$$\Omega^{(1)} = \left\{(x,y,z) \in \mathbb{R}^3 : \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \le 1\right\}, (40)$$

Here a, b and c denote the semi-axes of the outer ellipsoid. In the axisymmetric approximation, $a = b$, so that the outer boundary becomes a spheroid of revolution about the Oz −axis. For $a \neq b$ the transverse cross-sections are elliptical; nevertheless, the Oz-axis remains the principal geometric axis of the vortex and is assumed to coincide with the axis of its global rotation. The outer boundary

$$\partial\Omega^{(1)} = \left\{(x,y,z) : \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1\right\}. (41)$$

This boundary defines the spatial localization boundary of the coherent vortex structure and does not necessarily represent a solid wall or an interface separating different phases. The entire domain $\Omega^{(1)}$ is assumed to be filled with a single continuous incompressible fluid of constant density ρ_0 . Consequently, the velocity field satisfies

$$\nabla \cdot \mathbf{v}^{(1)} = 0. \quad (42)$$

Let

$$N = (0,0,c),\ O = (0,0,0),\ S = (0,0,-c) \quad (43)$$

denote the northern pole, geometric centre, and southern pole of the ellipsoid, respectively. The concave helical kern occupies a region

$$K^{(1)} \subset \Omega^{(1)} \cap \{0 \le z \le c\}. \quad (44)$$

The strict inequality $z < c$ is essential. At the exact northern pole $N = (0,0,c)$, the transverse radius of the ellipsoid is zero. Therefore, a kern having a finite inlet radius $R_N > 0$ cannot begin exactly at the northern pole. Its inlet must be located at some level $z = z_N < c$.

3.2. Geometry of the Concave Kern.

The wide inlet of the concave helical kern is located in the northern part of the vortex at the level

$$z = z_N, \qquad 0 < z_N < c, \quad (45)$$

whereas its narrow outlet is situated near the geometric center O. The longitudinal coordinate $s \in [0, L_K]$ is measured from the northern inlet toward the central outlet.

The axial coordinate of the kern is described by a smooth function $Z_K(s)$ satisfying

$$Z_K(0) = z_N, \quad Z_K(L_K) = 0, \quad Z_K'(s) < 0 . (46)$$

In the simplest approximation, one may choose

$$Z_K(s) = z_N\left(1 - \frac{s}{L_K}\right). \quad (47)$$

The radius of the local cross-section of the kern is described by the function $R_K(s)$, satisfying

$$R_K(0) = R_N, \quad R_K(L_K) = R_*, \quad R_N > R_* > 0. (48)$$

A convenient smooth contracting profile is

$$R_K(s) = R_* + (R_N - R_*)\left(1 - \frac{s}{L_K}\right)^p, \quad p > 1. (49)$$

Differentiating (49), we obtain

$$R_K'(s) = -\frac{p(R_N - R_*)}{L_K}\left(1 - \frac{s}{L_K}\right)^{p-1}, \quad (50)$$

and therefore $R_K'(s) < 0$. The second derivative is

$$R_K''(s) = \frac{p(p-1)(R_N - R_*)}{L_K^2}\left(1 - \frac{s}{L_K}\right)^{p-2}, (51)$$

so that $R_K''(s) > 0, \quad 0 \le s < L_K$. Thus, the kern narrows monotonically from the northern inlet toward the central outlet and possesses a smooth concave meridional profile for the chosen orientation of s.

The term **concave helical kern** refers not merely to the sign of $R_K''(s)$, but to the complete geometry of the inward-directed funnel. Its surface opens toward the northern region and contracts continuously toward the central outlet, forming a smooth transport region for the helical material filaments.

The local inclination angle introduced in Section 1 is

$$\tan\theta(s) = \left|\frac{R_K'(s)}{Z_K'(s)}\right|. \quad (52)$$

For the explicit profiles (47) and (49),

$$Z_K'(s) = -\frac{z_N}{L_K}, \quad (53)$$

and hence

$$\tan\theta(s) = \frac{p(R_N - R_*)}{z_N}\left(1 - \frac{s}{L_K}\right)^{p-1}. (54)$$

This relation explicitly describes the gradual variation of the local inclination of the funnel wall.

3.3. Distribution of the Helical Winding Density.

The general helical structure of the material filaments and the local winding density

$$q_K(s) = d\Psi_\alpha(s)/ds$$

were introduced in Section 1.1. We now specify an explicit distribution of $q_K(s)$ along the concave kern.

Since the kern narrows from the northern inlet toward the central outlet, we consider a model in which the local winding density varies monotonically along the longitudinal coordinate s. A convenient parametrization is

$$q_K(s) = q_N + (q_* - q_N)\left(\frac{s}{L_K}\right)^m, \quad m > 0 , (55)$$

where, $q_K(0) = q_N, \quad q_K(L_K) = q_*$. For a right-handed helical orientation, we assume

$$q_* > q_N > 0, \quad (56)$$

so that $q_K(s) > 0$ for all $s \in [0, L_K]$.

For the opposite chirality, one may instead impose

$$q_* < q_N < 0, \quad (57)$$

which gives $q_K(s) < 0$ for all $s \in [0, L_K]$.

Thus, in either case,

$$\operatorname{sgn} q_K(s) = \text{const}, \quad (58)$$

and the direction of the helical winding is preserved throughout the kern.

For $m > 0$, differentiation of Eq. (55) gives

$$q_K'(s) = \frac{m(q_* - q_N)}{L_K}\left(\frac{s}{L_K}\right)^{m-1}. \quad (59)$$

Hence, when $q_* > q_N > 0$, the winding density increases toward the outlet:

$$q_K'(s) > 0. \quad (60)$$

For the opposite chirality, the physically analogous increase in winding intensity corresponds to an increase of the magnitude $|q_K(s)|$. Therefore, the model describes a gradual intensification of the helical winding as the material filaments approach the narrowing outlet of the kern.

The corresponding filament geometry, tangent vector, tangent magnitude $\lambda_K(s)$, and unit tangent vector $\mathbf{T}_{K,\alpha}(s)$ are given by Eqs. (11)–(14).

Remark 1. For the distribution (55), the magnitude of the local helical winding density increases monotonically toward the outlet:

$$(d/ds)|q_K(s)| > 0,\ 0 < s < L_K \text{ and consequently, } |q_K(L_K)| > |q_K(0)| \quad (61)$$

3.4. Geometric Confinement of the Kern.

The complete kern must remain inside the outer ellipsoid. In the axisymmetric case $a = b$, this requires

$$R_K^2(s) \le a^2\left[1 - \frac{Z_K^2(s)}{c^2}\right]. \quad (62)$$

At the northern inlet $s = 0$, this gives

$$R_N^2 \le a^2\left(1 - \frac{z_N^2}{c^2}\right). \quad (63)$$

This condition explicitly demonstrates why a finite inlet radius $R_N > 0$ requires $z_N < c$. At the central outlet,

$$s = L_K, \quad Z_K(L_K) = 0, \quad R_K(L_K) = R_*, \quad (64)$$

and therefore, the outlet cross-section is

$$S_{\text{out}} = \{(x, y, 0):\ x^2 + y^2 \le R_*^2\}. \quad (65)$$

The lateral surface of the kern is assumed to be a material surface. If $F_K(x, y, z, t) = 0$ is its implicit representation, the material-surface condition is

$$\frac{DF_K}{Dt} = \frac{\partial F_K}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla F_K = 0. \quad (66)$$

In the quasistationary case,

$$\frac{\partial F_K}{\partial t} = 0, \quad (67)$$

and therefore $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_K = 0$ on the regular lateral surface of the kern. At the outlet, however, matter passes from the kern into the outer region. If $\mathbf{n}_{\text{out}}$ is oriented outward from the kern, then $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_{\text{out}} > 0$.

3.5. Tangential Transition from the Kern to the Outer Region.

At the outlet, a material filament neither terminates nor forms a new independent curve. Instead, the same material filament continues from the kern into the outer region.

Let its outer continuation be denoted by $\mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha}(\tau), \tau \ge 0$. Continuity of position requires $\mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha}(0) = \mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha}(L_K)$.

Tangential matching requires

$$\left.\frac{d\mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha}}{d\tau}\right|_{\tau=0} = \lambda_\alpha \left.\frac{d\mathbf{\Upsilon}_{K,\alpha}}{ds}\right|_{s=L_K}, \qquad \lambda_\alpha > 0. \quad (68)$$

The positive factor λ_α allows the two portions of the same geometric filament to be parametrized with different speeds while preserving their orientation. In terms of unit tangent vectors, $\mathbf{T}_{S,\alpha}(0) = \mathbf{T}_{K,\alpha}(L_K)$. If C^2-smooth geometric matching is required, one may additionally impose continuity of curvature: $\kappa_{S,\alpha}(0) = \kappa_{K,\alpha}(L_K)$. Thus, the transition from the kern to the outer region is a **tangential continuation**, rather than a physical detachment or termination of the material filament.

3.6. Relaxation of the Helical Winding.

After crossing the outlet, the filament is no longer geometrically constrained by the funnel surface. Nevertheless, it retains its vortex character and helical orientation.

A phenomenological relaxation of the winding density can be represented by

$$q_S(\tau) = q_\infty + (q_* - q_\infty)e^{-\nu_q \tau}, \quad \nu_q > 0, \quad (69)$$

where

$$q_* = q_K(L_K) \quad (70)$$

is the winding density at the outlet and $q_\infty \neq 0$ is its asymptotic residual value.

To exclude reversal of the helical orientation, we impose $q_* q_\infty > 0$. It then follows that

$$\operatorname{sgn} q_S(\tau) = \operatorname{sgn} q_* = \text{const}. \quad (71)$$

Thus, viscous relaxation may decrease the magnitude of the helical winding but does not reverse its orientation within the present model.

3.7. Formation of the Outer Quasi-Meridional Shell.

The southern part of the vortex is defined by $\Omega_-^{(1)} = \Omega^{(1)} \cap z < 0$. After crossing the central outlet, the filament initially continues in the tangential direction inherited from the kern. Its subsequent evolution is governed by the outer velocity field of the ellipsoidal vortex. The global rotation is characterized by

$$\mathbf{\Omega}_0 = \Omega_0 \mathbf{e}_z, \quad (72)$$

with the corresponding rotational velocity field

$$\mathbf{v}_{\text{rot}} = \mathbf{\Omega}_0 \times \mathbf{r}. \quad (73)$$

The translational velocity of the outer filament is represented schematically as

$$\mathbf{v}_S = \mathbf{v}_{\text{eject}} + \mathbf{v}_{\text{rot}} + \mathbf{v}_{\text{corr}}, \quad (74)$$

where $\mathbf{v}_{\text{eject}}$ represents the velocity inherited from the tangential transition through the outlet, $\mathbf{v}_{\text{rot}}$ is the contribution of the global rotation, and $\mathbf{v}_{\text{corr}}$ contains additional deformation and dissipative corrections.

The intrinsic spin of the microvortex filament is treated separately and may be characterized by $\mathbf{\Omega}_{\text{spin},\alpha}$ and the corresponding spin angular momentum $\mathbf{S}_\alpha$. Thus, intrinsic spin is not introduced as an independent additive translational velocity of the filament.

The outer shell is represented geometrically by a family of nested ellipsoidal surfaces

$$\Sigma_\lambda: \frac{x^2}{(\lambda a)^2} + \frac{y^2}{(\lambda b)^2} + \frac{z^2}{(\lambda c)^2} = 1, 1 - h \le \lambda \le 1. \quad (75)$$

Their parametrization is

$$\mathbf{r}_\lambda(\theta, \varphi) = (\lambda a \sin\theta \cos\varphi, \lambda b \sin\theta \sin\varphi, \lambda c \cos\theta). \quad (76)$$

An outer material filament can therefore be represented as

$$\mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha}(u) = \mathbf{r}_{\lambda_\alpha(u)}\big(\theta_\alpha(u), \varphi_\alpha(u)\big). \quad (77)$$

Allowing

$$\lambda_\alpha = \lambda_\alpha(u) \quad (78)$$

makes it possible for the filament to move through the finite thickness of the outer shell rather than being artificially restricted to a single ellipsoidal surface.

The azimuthal phase satisfies

$$\varphi_\alpha(u) = \varphi_{\alpha 0} + \int_0^u Q_\alpha(\xi), d\xi. \quad (79)$$

For a right-handed vortex, $Q_\alpha(u) > 0$, whereas for a left-handed vortex, $Q_\alpha(u) < 0$. Uniform chirality of the filament family requires

$$Q_\alpha(u) Q_\beta(v) > 0 \quad (80)$$

for all admissible α, β, u, v. The outer filaments are quasi-meridional rather than exact meridians. Geometrically, this means that the meridional contribution

to their tangent vector dominates the azimuthal contribution.

Using the corresponding metric coefficients h_θ and h_φ, this condition may be expressed as

$$h_\theta \left|\frac{d\theta_\alpha}{du}\right| > h_\varphi \left|\frac{d\varphi_\alpha}{du}\right|, \quad (81)$$

while

$$\frac{d\varphi_\alpha}{du} \neq 0. \quad (82)$$

Thus, the outer filaments retain a residual helical winding while following predominantly meridional return trajectories.

3.8. Non-Intersection of the Material Filaments.

Let the complete family of outer material filaments be

$$\mathcal{F}^{(1)} = \{\Upsilon_{S,\alpha} : \alpha \in \mathcal{A}\}. \quad (83)$$

For distinct filament labels, $\alpha \neq \beta$, the corresponding centreline curves must not intersect:

$$\Upsilon_{S,\alpha}(u) \neq \Upsilon_{S,\beta}(v) \quad (84)$$

for all admissible u and v, except at explicitly prescribed common inlet or matching sets if such sets are part of the construction. For vortex tubes of finite local radii $a_\alpha(u)$, a stronger local separation condition may be imposed:

$$|\Upsilon_{S,\alpha}(u) - \Upsilon_{S,\beta}(v)| > a_\alpha(u) + a_\beta(v). \quad (85)$$

This prevents overlap of the finite-thickness vortex tubes.

3.9. Global Material Transport Cycle.

The complete material transport should not be interpreted as motion through two independent terminal parts of a symmetric kern. Instead, the vortex of the first kind contains a single northern concave kern connected continuously with the outer return region.

The transport cycle is

$$K_N^{(1)} \to S_{\text{out}}^{(1)} \to \Omega_-^{(1)} \to S_h^{(1)} \to S_{\text{in},N}^{(1)} \to K_N^{(1)}. \quad (86)$$

Here $K_N^{(1)}$ is the northern concave kern, $S_{\text{out}}^{(1)}$ is its central outlet cross-section, $\Omega_-^{(1)}$ is the southern ejection region, $S_h^{(1)}$ is the outer quasi-meridional shell, and $S_{\text{in},N}^{(1)}$ is the northern return region through which matter re-enters the kern.

In a stationary incompressible regime, conservation of mass requires

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{return}} = Q_K\,. \quad (87)$$

For an incompressible fluid, let $\Phi_t : \Omega^{(1)} \to \Omega^{(1)}$ denote the material flow map generated by the velocity field,

$$\frac{d}{dt}\Phi_t(\mathbf{x}) = \mathbf{v}(\Phi_t(\mathbf{x}), t), \qquad \Phi_0(\mathbf{x}) = \mathbf{x}. \quad (88)$$

Since

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (89)$$

Liouville's formula gives

$$\frac{d}{dt}\det D\Phi_t = (\nabla \cdot \mathbf{v})\det D\Phi_t = 0. \quad (90)$$

Because

$$\det D\Phi_0 = 1, \quad (91)$$

it follows that

$$\det D\Phi_t = 1.$$

Thus, every material volume element is preserved under the flow, although its shape may change as a consequence of contraction inside the kern, tangential continuation through the outlet, stretching in the outer region, and viscous deformation.

The complete material filament may therefore be represented as a single continuous curve $\Upsilon_\alpha = \Upsilon_{K,\alpha} \cup \Upsilon_{S,\alpha}$, subject to the matching conditions $\Upsilon_{S,\alpha}(0) = \Upsilon_{K,\alpha}(L_K)$ and $\mathbf{T}_{S,\alpha}(0) = \mathbf{T}_{K,\alpha}(L_K)$. Here, the geometric model of the ellipsoidal vortex of the first kind is determined by four mutually connected structures: the outer ellipsoidal domain, the embedded northern concave helical kern, the continuous family of material filaments, and the quasi-meridional outer shell generated by their continuation. The compatibility conditions at the kern outlet, preservation of filament orientation, non-intersection of the material trajectories, incompressibility, and conservation of material volume provide the geometric basis for treating the kern and the outer shell as two regions of a single continuous vortex transport system.

4. Concept of the Unified Ellipsoidal Vortex and Definition of the Chirality of the Material Filaments.

The unified ellipsoidal vortex of the first kind is regarded as a connected material structure consisting of the outer ellipsoidal domain, the embedded northern concave helical kern, and a single continuous family of material vortex filaments that pass through the kern and continue into the outer quasi-meridional shell.

The kern and the outer shell therefore represent geometrically distinct but materially connected regions of a single vortex transport system. The geometric and tangential matching conditions established in Section 3 ensure that, for each filament label α, the internal filament $\Upsilon_{K,\alpha}$ possesses a unique continuous continuation $\Upsilon_{S,\alpha}$ into the outer region.

The complete material filament is therefore represented as $\Upsilon_\alpha = \Upsilon_{K,\alpha} \cup \Upsilon_{S,\alpha}$. At the outlet of the kern, $\Upsilon_{S,\alpha}(0) = \Upsilon_{K,\alpha}(L_K)$, and $\mathbf{T}_{S,\alpha}(0) = \mathbf{T}_{K,\alpha}(L_K)$. Thus, the transition from the kern into the outer shell does not correspond to the creation of a new filament but to the continuous deformation of the same material vortex line.

The concept of chirality of the unified vortex requires distinguishing three different but related characteristics:

$\chi_{\text{geom}}, \chi_{\text{spin}}, \chi_{\text{dyn}}$. They characterize, respectively, the geometry of the spatial trajectory, the intrinsic circulation orientation of the vortex filament, and the local alignment of the velocity and vorticity fields.

4.1. Geometric Chirality of a Material Filament.

Let a regular filament be represented by a smooth spatial curve

$$\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\gamma}(\ell), \quad (92)$$

where ℓ is the arc-length parameter.

The unit tangent vector is

$$\mathbf{T} = \frac{d\boldsymbol{\gamma}}{d\ell}\,. \quad (93)$$

The curvature is

$$\kappa = \left|\frac{d\mathbf{T}}{d\ell}\right|. \quad (94)$$

For $\kappa \neq 0$, the principal normal vector is

$$\mathbf{N} = \frac{1}{\kappa}\frac{d\mathbf{T}}{d\ell}, \quad (95)$$

and the binormal vector is

$$\mathbf{B} = \mathbf{T} \times \mathbf{N}. \quad (96)$$

The torsion is defined by

$$\tau = -\frac{d\mathbf{B}}{d\ell} \cdot \mathbf{N}. \quad (97)$$

Although torsion characterizes the local three-dimensional geometry of a curve, its sign alone cannot serve as a universal measure of filament chirality. The torsion may vanish or change sign locally without reversal of the intrinsic rotational orientation of the vortex filament. Therefore, in general, $\chi_{\text{geom}} \neq \operatorname{sgn} \tau$.

To define geometric chirality relative to the principal vortex axis, let $\mathbf{e}_z$ be the unit vector oriented from the southern pole toward the northern pole. For a point with position vector $\mathbf{r}$, define the transverse radius vector

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{r} - (\mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_z)\mathbf{e}_z \quad (98)$$

The quantity $\mathbf{e}_z \cdot (\boldsymbol{\rho} \times \mathbf{T})$ determines the local sense in which the filament winds around the vortex axis.

The geometric chirality of the filament is defined by

$$\chi_{\text{geom}} = \operatorname{sgn}\{[\mathbf{e}_z \cdot (\boldsymbol{\rho} \times \mathbf{T})](\mathbf{T} \cdot \mathbf{e}_z)\}. \quad (99)$$

The first factor characterizes the azimuthal orientation of the filament, whereas the second distinguishes the direction of longitudinal transport relative to the oriented Oz-axis.

This definition is invariant under reversal of the curve parametrization. Indeed, under $\mathbf{T} \mapsto -\mathbf{T}$, one has

$$\mathbf{e}_z \cdot (\boldsymbol{\rho} \times \mathbf{T}) \mapsto -\mathbf{e}_z \cdot (\boldsymbol{\rho} \times \mathbf{T}), \quad (100)$$

and simultaneously

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{e}_z \mapsto -\mathbf{T} \cdot \mathbf{e}_z. \quad (101)$$

Therefore, their product remains unchanged.

For the helical kern,

$$\Psi_\alpha(s) = \alpha + \int_0^s q_K(\xi)\, d\xi, \quad (102)$$

so that

$$q_K(s) = \frac{d\Psi_\alpha}{ds}. \quad (103)$$

Since

$$Z_K'(s) < 0, \quad (104)$$

a local axial form of the geometric chirality inside the kern may be written as

$$\chi_{\text{geom},K} = \operatorname{sgn}[q_K(s) Z_K'(s)]. \quad (105)$$

This expression is a particular form of the more general definition (99). However, definition (99) is meaningful only in regular regions, where

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{e}_z \neq 0 \quad (106)$$

and

$$\mathbf{e}_z \cdot (\boldsymbol{\rho} \times \mathbf{T}) \neq 0. \quad (107)$$

During the turning of an outer filament, there may exist a point at which

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{e}_z = 0.$$

At such a point,

$$\chi_{\text{geom}} = 0$$

or becomes locally undefined as a handedness index. This does not imply disappearance or reversal of the intrinsic rotational orientation of the filament.

Thus, geometric chirality is a property of the spatial trajectory and need not remain globally defined during all stages of the filament motion.

4.2. Circulation Vector and Spin Chirality.

The intrinsic rotational orientation of a material filament is characterized by the circulation around a small transverse contour C_α enclosing the vortex tube:

$$\Gamma_\alpha = \oint_{C_\alpha} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l}. \quad (108)$$

The sign of Γ_α determines the orientation of circulation around the local filament axis. We introduce the oriented microvortex circulation vector

$$\boldsymbol{\mu}_\alpha = \Gamma_\alpha \mathbf{T}_\alpha. \quad (109)$$

The vector $\boldsymbol{\mu}_\alpha$ is tangent to the material filament, while its orientation incorporates the sign of the local circulation. Its magnitude is

$$|\boldsymbol{\mu}_\alpha| = |\Gamma_\alpha|. \quad (110)$$

The spin chirality of the filament is therefore defined by

$$\chi_{\text{spin},\alpha} = \operatorname{sgn} \Gamma_\alpha. \quad (111)$$

For positive circulation,

$$\chi_{\text{spin},\alpha} = +1, \quad (112)$$

whereas for negative circulation,

$$\chi_{\text{spin},\alpha} = -1. \quad (113)$$

This definition is particularly useful when the spatial trajectory of the filament bends or reverses its meridional direction. The tangent vector $\mathbf{T}_\alpha$ changes continuously with the geometry of the filament, and consequently the circulation vector [1]:

$$\boldsymbol{\mu}_\alpha = \Gamma_\alpha \mathbf{T}_\alpha \quad (114)$$

is transported together with the filament. If the sign of circulation is conserved,

$$\Gamma_\alpha(t) \neq 0, \qquad \operatorname{sgn} \Gamma_\alpha(t) = \operatorname{sgn} \Gamma_\alpha(0), \quad (115)$$

then $\chi_{\text{spin},\alpha} = \text{const}$. Therefore, a boomerang-like geometric turning of the filament does not represent a transition from right-handed to left-handed intrinsic circulation [4].

The global single-chirality condition for the complete family of filaments is

$$\operatorname{sgn} \Gamma_\alpha = \chi_0, \quad \forall \alpha \in \mathcal{A}, \quad \chi_0 \in -1, +1. \quad (116)$$

Equivalently,

$$\Gamma_\alpha \Gamma_\beta > 0 \quad (117)$$

for every pair of material filaments α, β.

The chirality of the kern is therefore defined as

$$\chi_K = \chi_0 \Leftrightarrow \operatorname{sgn} \Gamma_{K,\alpha} = \chi_0 \quad \forall\, \alpha. \quad (118)$$

Similarly, the chirality of the outer shell is

$$\chi_S = \chi_0 \Leftrightarrow \operatorname{sgn} \Gamma_{S,\alpha}(u) = \chi_0 \quad (119)$$

for all filaments and all admissible values of u.

The defining condition of a unified single-chirality vortex is therefore

$$\chi_K = \chi_S = \chi_0. \quad (120)$$

At the kern outlet, conservation of the intrinsic circulation orientation requires

$$\operatorname{sgn} \Gamma_{S,\alpha}(0) = \operatorname{sgn} \Gamma_{K,\alpha}(L_K). \quad (121)$$

Under exact circulation conservation,

$$\Gamma_{S,\alpha}(0) = \Gamma_{K,\alpha}(L_K). \quad (122)$$

The corresponding circulation vectors satisfy

$$\boldsymbol{\mu}_{S,\alpha}(0) = \Gamma_\alpha \mathbf{T}_{S,\alpha}(0) = \Gamma_\alpha \mathbf{T}_{K,\alpha}(L_K) = \boldsymbol{\mu}_{K,\alpha}(L_K). \quad (123)$$

Thus, tangential continuity and circulation conservation together imply continuity of the oriented circulation vector at the kern–shell transition.

4.3. Dynamic Chirality.

The dynamic chirality of the flow is characterized by the local helicity density

$$h(\mathbf{r}, t) = \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \cdot \boldsymbol{\omega}(\mathbf{r}, t), \quad (124)$$

where

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v} \quad (125)$$

is the vorticity field. The corresponding dynamic chirality index is defined as

$$\chi_{\mathrm{dyn}} = \mathrm{sgn}(\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega}). \quad (126)$$

If $\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega} > 0$, then $\chi_{\mathrm{dyn}} = +1$. If $\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega} < 0$, then $\chi_{\mathrm{dyn}} = -1$. The condition $\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega} \neq 0$ throughout a region describes a locally helical flow with nonvanishing dynamic chirality. However, the sign of the helicity density is not identical to the intrinsic circulation chirality of an individual material filament. Therefore, in general, the dynamic and spin chirality indices need not coincide:

$$\chi_{\mathrm{dyn}} \neq \chi_{\mathrm{spin}} \quad (127)$$

Such a local mismatch does not imply destruction of the coherent vortex structure.

Likewise, a local change in the sign of $\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega}$ does not by itself imply reversal of the material circulation Γ_α.

Thus, the dynamic chirality describes the local relation between velocity and vorticity fields, whereas the spin chirality describes the intrinsic orientation of circulation transported by the material filament.

4.4. Compatibility of the Three Chirality Indices.

In regular regions of coherent helical motion, the three chirality indices may be mutually consistent. The aligned helical regime is defined by

$$\chi_{\mathrm{geom}} = \chi_{\mathrm{spin}} = \chi_{\mathrm{dyn}} = \chi_0.$$

This relation means that the geometric winding of the filament, its intrinsic circulation, and the local velocity-vorticity alignment all possess the same orientation. However, this equality is not required globally throughout the entire transport cycle. In particular, in a turning region of the outer shell, $\mathbf{T} \cdot \mathbf{e}_z \to 0$, and the geometric chirality may temporarily vanish or lose its local definition. At the same time, the intrinsic circulation may remain nonzero: $\Gamma_\alpha \neq 0$. Therefore, $\chi_{\mathrm{spin}} = \chi_0$ remains the principal material chirality invariant of the vortex model.

The preservation of a single chirality from the kern into the outer shell is expressed by $\mathrm{sgn}\,\Gamma_{K,\alpha} = \mathrm{sgn}\,\Gamma_{S,\alpha} = \chi_0$.

The geometric winding densities must also preserve their orientation: $q_K(s)q_S(u) > 0$. Thus, the magnitude of the winding density may decrease after the filament leaves the kern,

$$|q_S(u)| < |q_K(L_K)|, \quad (128)$$

but its sign must not reverse. The same condition may be expressed through the local spin angular velocity. Let $\vartheta_\alpha(\ell, t)$ denote the intrinsic rotational phase of the microvortex filament. Its material angular velocity is

$$\Omega_{\mathrm{spin},\alpha} = \frac{D\vartheta_\alpha}{Dt}. \quad (129)$$

A single-chirality family satisfies $\Omega_{\mathrm{spin},\alpha}\Omega_{\mathrm{spin},\beta} > 0$ for all filament labels α, β. Viscous effects may reduce the magnitude of the spin angular velocity. A simple relaxation law is

$$\left|\Omega_{\mathrm{spin},\alpha}(t)\right| = \left|\Omega_{\mathrm{spin},\alpha}(0)\right| e^{-t/\tau_\nu}, \tau_\nu > 0\ . \quad (130)$$

The orientation is preserved if $\mathrm{sgn}\,\Omega_{\mathrm{spin},\alpha}(t) = \mathrm{sgn}\,\Omega_{\mathrm{spin},\alpha}(0)$. Thus, viscosity may weaken the rotational intensity without producing an inversion of chirality. The global rotation of the ellipsoidal vortex is characterized by $\boldsymbol{\Omega}_0 = \Omega_0 \mathbf{e}_z$. For a globally aligned configuration, the orientation of the local spin vectors relative to the global rotation may be required to have the same sign for all filaments:

$$\mathrm{sgn}\,(\mathbf{S}_\alpha \cdot \boldsymbol{\Omega}_0) = \mathrm{const}. \quad (131)$$

This condition characterizes global orientational coherence but, by itself, does not constitute a proof of dynamical stability. The principal chirality-preservation condition of the unified vortex is therefore

$$\chi_{\mathrm{spin},\alpha} = \mathrm{sgn}\,\Gamma_\alpha = \chi_0 = \mathrm{const} \quad (132)$$

for every material filament throughout its passage from the concave kern into the outer shell.

Consequently, the filament may change its curvature, local meridional direction, winding density, and orientation relative to the global Oz-axis without losing its intrinsic circulation handedness. In this sense, the unified ellipsoidal vortex of the first kind preserves a single material chirality even when the geometry of the individual filament trajectories changes substantially during the transport cycle.

5. Mathematical Model of the Formation of the Concave Helical Kern and Matter Ejection.

The formation of the concave helical kern is regarded as a spatial concentration of an incompressible flow with nonzero circulation, directed from the broad northern region of the ellipsoidal vortex toward the central outlet cross-section. The local model must simultaneously describe the longitudinal–radial convergence of matter, its rotation about the axis of the kern, and the formation of helical material filaments. For this purpose, the transverse motion is represented as a superposition of a potential component, responsible for concentrating the flow, and a circulation component, which determines its twist.

5.1. Regularized Sink–Vortex Flow.

Let the outer vortex domain be denoted by Ω, and let the concave kern occupy the region

$$K \subset \Omega \cap \{z \geq 0\}. \quad (133)$$

Consider a local transverse cross-section of the kern and introduce Cartesian coordinates (x, y) in this plane. The transverse velocity vector is denoted by

$$\mathbf{v}_\perp = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}. \quad (134)$$

As a local closure assumption of the present model, we adopt a quasistationary phenomenological balance of the form

$$\mathbf{0} = -\nabla_\perp p + \mathbf{f}_{\mathrm{rot}} - \mathbf{K}\,\mathbf{v}_\perp, \quad (135)$$

where the three terms represent, respectively, the transverse pressure force, the effective rotational forcing, and the viscous–geometric resistance. Here p is the pressure, $\mathbf{f}_{\mathrm{rot}}$ is the effective force associated with the rotational component of the flow, and $\mathbf{K}$ is a symmetric positive-definite effective resistance tensor accounting for local viscous resistance and possible anisotropy of the transverse cross-section. If $\mathbf{K}$ is nonsingular, one obtains

$$\mathbf{v}_\perp = -\mathbf{M}\nabla_\perp p + \mathbf{v}_{\mathrm{rot}},\ \mathbf{M} = \mathbf{K}^{-1},\ \mathbf{v}_{\mathrm{rot}} = \mathbf{M}\mathbf{f}_{\mathrm{rot}}. \quad (136)$$

The tensor $\mathbf{M}$ is therefore interpreted as an effective mobility tensor.

After transformation to the principal directions,

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix}, \quad M_1 > 0, \quad M_2 > 0. \quad (137)$$

Let (ξ, η) denote the corresponding principal coordinates. Introduce the scaled variables

$$\xi_1 = \frac{\xi}{\sqrt{M_1}}, \qquad \eta_1 = \frac{\eta}{\sqrt{M_2}}. \quad (138)$$

Then the family of ellipses

$$\frac{\xi^2}{M_1} + \frac{\eta^2}{M_2} = R^2 \quad (139)$$

is transformed into the family of circles,

$$\xi_1^2 + \eta_1^2 = R^2. \quad (140)$$

This transformation allows the anisotropic physical cross-section to be represented by an isotropic scaled plane.

For an incompressible transverse flow, $\nabla_\perp \cdot \mathbf{v}_\perp = 0$, a stream function ψ may be introduced. In the scaled coordinates,

$$v_{\xi_1} = \frac{\partial \psi}{\partial \eta_1}, \qquad v_{\eta_1} = -\frac{\partial \psi}{\partial \xi_1}. \quad (141)$$

The corresponding transverse vorticity is

$$\omega_\perp = \frac{\partial\, v_{\eta_1}}{\partial \xi_1} - \frac{\partial\, v_{\xi_1}}{\partial \eta_1} = -\,\Delta_\perp \psi\,. \quad (142)$$

Outside the finite outlet region, the idealized local transverse field is assumed to contain no distributed vorticity. Hence, $\omega_\perp = 0$, and therefore

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta_1^2} = 0, \qquad R > R_*, \quad (143)$$

Here $R_* > 0$ characterizes the finite radius of the central outlet cross-section.

Introduce polar coordinates in the scaled plane,

$$\xi_1 = R\cos\varphi, \qquad \eta_1 = R\sin\varphi. \quad (144)$$

The converging potential component of the transverse flow is taken in the form

$$\mathbf{v}_{\text{pot}} = -\frac{A}{R}\mathbf{e}_R, \qquad A > 0, \quad (145)$$

whereas the rotational component is

$$\mathbf{v}_{\text{rot}} = \frac{G}{R}\mathbf{e}_\varphi, \quad (146)$$

where $G \neq 0$ determines both the intensity and the direction of the local rotation. The complete total transverse velocity field is therefore

$$\mathbf{v}_\perp = -\frac{A}{R}\mathbf{e}_R + \frac{G}{R}\mathbf{e}_\varphi. \quad (147)$$

The parameter A controls the strength of convergence toward the outlet, whereas G determines the intensity and orientation of the azimuthal circulation.

In the scaled Cartesian coordinates, Eq. (147) becomes

$$v_{\xi_1} = -\frac{A\xi_1 + G\eta_1}{\xi_1^2 + \eta_1^2}, \qquad v_{\eta_1} = -\frac{A\eta_1 - G\xi_1}{\xi_1^2 + \eta_1^2}. \quad (148)$$

The terms proportional to A describe convergence toward the central outlet, whereas those proportional to G describe rotation around the local axis.

The idealized field (147) is applied only in the exterior of the finite outlet region, $R > R_*$. Thus, the singularity of the mathematical sink–vortex field at $R = 0$ is not interpreted as a physical infinite velocity. Instead, the singular point is excluded from the physical domain and replaced by a finite outlet cross-section of characteristic radius R_*, through which matter leaves the concave kern and enters the outer region of the ellipsoidal vortex.

In this sense, the field $\mathbf{v}_\perp$ in Eq. (147) should be interpreted as a **local regularized sink–vortex approximation** valid outside the central outlet, rather than as a global solution for the entire kern.

5.2. Flux and Circulation.

The inward mass flux through a circular contour C_R is

$$Q_\perp = \rho \oint_{C_R} \mathbf{v}_\perp \cdot \mathbf{n}, ds. \quad (149)$$

Since the azimuthal component does not contribute to the normal flux,

$$Q_\perp = \rho \oint_{C_R} \left(-\frac{A}{R}\right) ds. \quad (150)$$

Using

$$ds = R\, d\varphi, \quad (151)$$

we obtain

$$Q_\perp = -2\pi\rho A. \quad (152)$$

Hence,

$$A = \frac{|Q_\perp|}{2\pi\rho}. \quad (153)$$

The circulation around the same contour is

$$\Gamma = \oint_{C_R} \mathbf{v}_\perp \cdot d\mathbf{l}. \quad (154)$$

Only the azimuthal component contributes, and therefore

$$\Gamma = \int_0^{2\pi} \frac{G}{R} R, d\varphi. \quad (155)$$

Thus,

$$\Gamma = 2\pi G, \quad (156)$$

or equivalently,

$$G = \frac{\Gamma}{2\pi}. \quad (157)$$

Consequently,

$$\operatorname{sgn} G = \operatorname{sgn} \Gamma. \quad (158)$$

Thus, the sign of the parameter G determines the orientation of the local circulation.

5.3. Logarithmic-Spiral Streamlines.

The trajectories of the local transverse flow satisfy

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{A}{R}, \quad (159)$$

and

$$R\frac{d\varphi}{dt} = \frac{G}{R}. \quad (160)$$

Hence,

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{G}{R^2}. \quad (161)$$

Eliminating time gives

$$\frac{dR}{d\varphi} = \frac{dR/dt}{d\varphi/dt} = -\frac{A}{G}R. \quad (162)$$

Therefore,

$$\frac{d\,\ln R}{d\varphi} = -\frac{A}{G}. \quad (163)$$

Integration yields

$$R(\varphi) = R_0 \exp\left[-\frac{A}{G}(\varphi - \varphi_0)\right]. \quad (164)$$

Thus, the local transverse streamlines are logarithmic spirals.

The angle β between the streamline and the local azimuthal direction is determined by

$$\tan\beta = \left|\frac{v_R}{v_\varphi}\right|. \quad (165)$$

Since

$$v_R = -\frac{A}{R}, \qquad v_\varphi = \frac{G}{R}, \tag{166}$$

we obtain

$$\tan\beta = \left|\frac{A}{G}\right|. \tag{167}$$

Therefore, the geometry of the local spiral is controlled by the ratio between convergence intensity and circulation intensity.

If $|G| \gg A$, rotation dominates and the trajectories approach nearly circular motion.

If $A \gg |G|$, convergence dominates and the trajectories become more strongly directed toward the outlet.

If $G = 0$, the rotational component vanishes and

$$\mathbf{v}_\perp = -\frac{A}{R}\mathbf{e}_R\,, \tag{168}$$

so that no helical winding is produced. Thus, nonzero circulation, $G \neq 0$, is necessary in the present model for the formation of a locally spiral transverse flow.

5.4. Connection Between the Local Flow and the Helical Geometry.

The three-dimensional helical geometry of the kern is described by the phase

$$\Psi_\alpha(s) = \alpha + \int_0^s q_K\,(\xi)\,d\xi. \tag{169}$$

Therefore,

$$q_K(s) = \frac{d\Psi_\alpha}{ds}. \tag{170}$$

Let v_s denote the longitudinal transport velocity along the kern and v_φ the azimuthal velocity around its local axis.

Then

$$\frac{ds}{dt} = v_s, \tag{171}$$

while the angular rate is

$$\frac{d\Psi_\alpha}{dt} = \frac{v_\varphi}{R_K(s)}. \tag{172}$$

Hence,

$$q_K(s) = \frac{d\Psi_\alpha/dt}{ds/dt}. \tag{173}$$

Therefore,

$$q_K(s) = \frac{v_\varphi(s)}{R_K(s)v_s(s)}, \qquad v_s(s) \neq 0. \tag{174}$$

Equivalently,

$$R_K(s)q_K(s) = \frac{v_\varphi(s)}{v_s(s)}. \tag{175}$$

Equation (174) establishes a direct connection between the geometric winding density of the material filament and the local kinematics of the flow.

For transport from the northern inlet toward the outlet, let $v_s > 0$. Then $\operatorname{sgn} q_K = \operatorname{sgn} v_\varphi$. Since the azimuthal velocity is determined by G,

$$\operatorname{sgn} v_\varphi = \operatorname{sgn} G. \tag{176}$$

Using $\operatorname{sgn} G = \operatorname{sgn} \Gamma$, we obtain the fundamental chirality relation

$$\operatorname{sgn} q_K = \operatorname{sgn} G = \operatorname{sgn} \Gamma\ = \chi_{\text{spin}}. \tag{177}$$

Thus, the geometric orientation of the helical winding, the orientation of the local transverse vortex, and the sign of the material circulation are mutually consistent within the present model.

This relation establishes the direct connection between the geometric description developed in Sections 1–3 and the chirality definition introduced in Section 4.

5.5. Conservation of Mass in the Narrowing Kern.

For an incompressible flow, the mass flow rate through transverse cross-sections of the kern is conserved in the stationary regime:

$$Q_K = \rho \int_{A_K(s)} \mathbf{v}\cdot\mathbf{n}_s\,dA = \text{const.} \tag{178}$$

Here $A_K(s)$ is the local cross-sectional area and $\mathbf{n}_s$ is the unit normal to that cross-section.

In a one-dimensional approximation, $Q_K \simeq \rho A_K(s)\overline{v}_s(s)$, where $\overline{v}_s$ is the mean longitudinal velocity. For a circular cross-section,

$$A_K(s) = \pi R_K^2(s). \tag{179}$$

Therefore,

$$\overline{v}_s(s) = \frac{Q_K}{\rho\pi R_K^2(s)}. \tag{180}$$

Hence,

$$R_K(s)\downarrow \quad \Rightarrow \quad \overline{v}_s(s)\uparrow. \tag{181}$$

Thus, narrowing of the kern causes an increase in the mean longitudinal transport velocity. This increase is a consequence of incompressibility and conservation of mass flux and does not require an additional dynamical assumption.

5.6. Circulation Conservation and Intensification of Rotation.

Let the circulation around a material vortex tube be

$$\Gamma_K(s) = \oint_{C_K(s)} \mathbf{v}\cdot d\mathbf{l}. \tag{182}$$

Under the additional assumption of circulation conservation,

$$\Gamma_K(s) = \Gamma_0 = \text{const.} \tag{183}$$

For a characteristic circular contour of radius $R_K(s)$,

$$v_\varphi(s) \sim \frac{\Gamma_0}{2\pi R_K(s)}. \tag{184}$$

Therefore,

$$v_\varphi(s) \sim R_K^{-1}(s) \tag{185}$$

The corresponding local angular velocity is

$$\Omega_K(s) = \frac{v_\varphi(s)}{R_K(s)}, \tag{186}$$

and hence

$$\Omega_K(s) \sim \frac{\Gamma_0}{2\pi R_K^2(s)}. \tag{187}$$

Thus, $R_K(s)\downarrow \quad \Rightarrow \quad \Omega_K(s)\uparrow$, provided that circulation is conserved. Consequently, in the narrowing part of the kern, both the mean longitudinal velocity $\overline{v}_s \propto R_K^{-2}$ and the characteristic angular velocity $\Omega_K \propto R_K^{-2}$ increase.

This provides a hydrodynamic mechanism for the intensification of transport and rotation toward the central outlet.

However, the increase of the geometric winding density q_K is governed by

$$q_K = \frac{v_\varphi}{R_K v_s}, \tag{188}$$

and therefore, depends on the relative scaling of v_φ and v_s. It should not be inferred solely from the decrease of R_K.

5.7. Transition to the Outer Vortex Region.

The geometric continuity and tangential matching of the material filaments at the kern outlet were established in Section 3. Hydrodynamic continuity additionally requires continuity of the velocity field across the transition:

$$\mathbf{v}_S(0) = \mathbf{v}_K(L_K). \quad (189)$$

After crossing the outlet, the filament is no longer constrained by the geometry of the concave funnel. Its subsequent translational motion is governed by the outer velocity field, which is represented schematically as

$$\mathbf{v}_S = \mathbf{v}_{\text{out}} + \mathbf{\Omega}_0 \times \mathbf{r} + \mathbf{v}_{\text{corr}}. \quad (190)$$

Here $\mathbf{v}_{\text{out}}$ is the velocity inherited from the kern outlet, $\mathbf{\Omega}_0 \times \mathbf{r}$ represents the global rotational field of the ellipsoidal vortex, and $\mathbf{v}_{\text{corr}}$ denotes additional deformation and dissipative corrections.

The intrinsic rotational state of the filament is described separately by the circulation vector

$$\boldsymbol{\mu}_\alpha = \Gamma_\alpha \mathbf{T}_\alpha \quad (191)$$

and, when required, by the intrinsic spin angular velocity $\Omega_{\text{spin},\alpha}$. The outer material trajectory satisfies

$$\frac{d\mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha}}{dt} = \mathbf{v}_S\big(\mathbf{\Upsilon}_{S,\alpha}(t), t\big). \quad (192)$$

Thus, the local sink–vortex model determines the formation and helical organization of the flow inside the concave kern, whereas the subsequent evolution of the same material filament is controlled by the outer velocity field.

The local model therefore establishes the chain

Convergence + Circulation $\Rightarrow$ Spiral transverse flow $\Rightarrow$ Helical winding

together with the fundamental orientation relation

$$\operatorname{sgn} q_K = \operatorname{sgn} G = \operatorname{sgn} \Gamma = \chi_{\text{spin}}. \quad (193)$$

Hence, the local hydrodynamic model of the concave kern is consistent with the geometric and chirality structure of the unified ellipsoidal vortex of the first kind.

6. Advection-Dominated Stretched Helical Surface Layer.

The wall of the concave helical kern has so far been treated as a prescribed geometric surface. This section proposes a hydrodynamic mechanism that generates such a wall for a funnel-type free surface at a drain, without invoking a Taylor–Couette-type cellular instability, which presupposes two rigid bounding surfaces and a prescribed shear and is therefore not the natural model for a free-surface funnel flow.

6.1. Local Geometry and Surface Velocity.

Let the instantaneous free surface of the funnel be a surface of revolution

$$\mathbf{X}(s, \varphi, t) = \big(R(s,t)\cos\varphi,\ R(s,t)\sin\varphi,\ Z(s,t)\big), \quad (194)$$

where s is a coordinate along the meridional generatrix, measured toward the drain, and $R(s,t) > 0$ is the local radius of the surface of revolution. The local orthonormal frame $(\mathbf{e}_s, \mathbf{e}_\varphi, \mathbf{n})$ is tangent to the meridian, tangent to the parallel, and normal to the surface, respectively.

The fluid velocity at the free surface decomposes as

$$\mathbf{v} = u_s \mathbf{e}_s + u_\varphi \mathbf{e}_\varphi + u_n \mathbf{n}, \quad (195)$$

and for a material layer pressed against the free surface the normal component is small compared with the tangential components,

$$|u_n| \ll |u_s|,\ |u_\varphi|, \quad (196)$$

so that, to leading order, the surface velocity is

$$\mathbf{v}_\Sigma = u_s \mathbf{e}_s + u_\varphi \mathbf{e}_\varphi. \quad (197)$$

A material particle confined to the surface satisfies

$$\frac{ds}{dt} = u_s, \qquad R(s)\frac{d\varphi}{dt} = u_\varphi, \quad (198)$$

so that its trajectory obeys

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{u_\varphi(s)}{R(s)u_s(s)}. \quad (199)$$

Equation (199) is the governing equation for the geometry of the surface-advected helical filaments.

6.2. Surface Deformation and Rotation Tensors.

Let $\Sigma(t)$ denote the free surface, parametrized by $\mathbf{X}(s, \varphi, t)$, with tangential surface velocity $\mathbf{v}_\Sigma = u_s \mathbf{e}_s + u_\varphi \mathbf{e}_\varphi$. The surface velocity gradient decomposes into symmetric and antisymmetric parts,

$$\nabla_\Sigma \mathbf{v}_\Sigma = \mathbf{D}_\Sigma + \mathbf{W}_\Sigma, \quad (200)$$

where

$$\mathbf{D}_\Sigma = \frac{1}{2}[\nabla_\Sigma \mathbf{v}_\Sigma + (\nabla_\Sigma \mathbf{v}_\Sigma)^T] \quad (201)$$

is the surface rate-of-strain tensor and

$$\mathbf{W}_\Sigma = \frac{1}{2}[\nabla_\Sigma \mathbf{v}_\Sigma - (\nabla_\Sigma \mathbf{v}_\Sigma)^T] \quad (202)$$

is the tensor of local surface rotation.

For a material line element $d\boldsymbol{\ell} \in T\Sigma$ tangent to the surface, transport by the flow gives

$$\frac{D}{Dt} d\boldsymbol{\ell} = (\nabla_\Sigma \mathbf{v}_\Sigma) d\boldsymbol{\ell}. \quad (203)$$

6.3. Definition of the Advection-Dominated Stretched Helical Surface Layer.

Definition. A thin fluid layer $\mathcal{L}_h(t)$ adjacent to the free funnel surface $\Sigma(t)$ is called an **advection-dominated stretched helical surface layer** if it is transported by the flow map Φ_t, its normal velocity is asymptotically smaller than its tangential velocity, and its material filaments undergo simultaneous tangential stretching and persistent azimuthal twisting.

Explicitly, the layer is defined by the following conditions.

(i) *Material transport.* The layer is carried by the flow as a material region,

$$\mathcal{L}_h(t) = \Phi_t\big(\mathcal{L}_h(0)\big), \quad (204)$$

where Φ_t is the Lagrangian flow map generated by the velocity field,

$$\frac{d}{dt}\Phi_t(\mathbf{a}) = \mathbf{v}(\Phi_t(\mathbf{a}), t). \quad (205)$$

(ii) *Surface confinement.* The normal velocity is small compared with the surface velocity,

$$|v_n| \ll |\mathbf{v}_\Sigma|, \quad (206)$$

so that the motion occurs predominantly along the surface.

(iii) *Tangential stretching*. For a unit tangent $\mathbf{T}$ of a material filament, define its stretching rate through the surface rate-of-strain tensor,

$$\frac{1}{l}\frac{Dl}{Dt} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{D}_\Sigma \mathbf{T}, \quad (207)$$

where l is the material length of the filament. The layer is stretched if

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{D}_\Sigma \mathbf{T} > 0 \quad (208)$$

(iv) Persistent azimuthal twisting. The local winding density of the material filaments is defined by

$$q(s,t) = \frac{d\varphi}{ds} = \frac{u_\varphi(s,t)}{R(s,t)u_s(s,t)} \qquad (209)$$

and the layer is twisted if

$$q(s,t) \neq 0. \qquad (210)$$

The condition $\operatorname{sgn} q = \text{const}$ expresses preservation of a single chirality of the helical lines along the funnel, consistently with the chirality conditions of Section 4.2.

Conditions (204)–(209) jointly replace the notion of a rigid rotating wall, of the type presupposed by a Taylor–Couette description, with that of a self-consistently advected material layer.

6.4. Material-Spiral Layer and the Logarithmic-Spiral Solution.

A thin surface layer $\mathcal{L}_h(t)$ is called an advectively stretched spiral layer if there exists a family of material curves

$$\gamma_\alpha(s,t) = \mathbf{X}(s,\varphi_\alpha(s,t),t), \quad \frac{D\gamma_\alpha}{Dt} = \mathbf{v}(\gamma_\alpha,t), \qquad (211)$$

satisfying

$$\frac{\partial\varphi_\alpha}{\partial s} = q(s,t) \neq 0, \quad \frac{D}{Dt}|\partial_s\gamma_\alpha| > 0,$$
$$|v_n| \ll \sqrt{u_s^2 + u_\varphi^2}\,. \qquad (212)$$

The first condition fixes the helical structure, the second its material stretching, and the third the confinement of the motion to the funnel surface.

If, locally, the funnel is close to a cone, $R(s) \sim s\sin\alpha$, and the ratio of the azimuthal to the meridional velocity is approximately constant along a filament,

$$q(s,t) \simeq \frac{\beta}{s}, \qquad \beta = \text{const}, \qquad (213)$$

then, using $q = d\varphi/ds$, integration of Eq. (213) gives

$$\varphi - \varphi_0 = \beta \ln\frac{s}{s_0}, \qquad (214)$$

equivalently

$$s = s_0\, e^{(\varphi-\varphi_0)/\beta}. \qquad (215)$$

Since $R \propto s$ for the locally conical surface, this yields

$$R(\varphi) = R_0 \exp\left[\frac{\varphi-\varphi_0}{\beta}\right], \qquad (216)$$

which is precisely a **logarithmic spiral**. Thus, the logarithmic-spiral geometry of the surface filaments need not be imposed separately: it arises automatically whenever the ratio u_φ/u_s remains approximately constant along the conical part of the funnel wall, consistently with the local sink–vortex analysis of Section 5.

6.5. Layer Thickness and Conservation of Angular Momentum.

The thickness $h(s,t)$ of the surface layer is constrained by conservation of the mass flux carried within it. For an axisymmetric thin layer,

$$Q = 2\pi R(s)\, h(s)\, \overline{u}_s(s), \qquad (217)$$

so that

$$h(s) = \frac{Q}{2\pi R(s)\overline{u}_s(s)}. \qquad (218)$$

As the drain is approached, $R(s)$ decreases while $\overline{u}_s(s)$ typically increases; the layer therefore need not thicken and may instead contract into a thin, fast-moving shell, consistently with the picture of tightly wound spiral filaments.

Away from strong viscous dissipation, the rotational component satisfies approximate conservation of specific angular momentum,

$$R\,u_\varphi \simeq \ell = \text{const}, \qquad u_\varphi(R) \simeq \frac{\ell}{R}, \qquad (219)$$

so that the azimuthal velocity increases as R decreases – the familiar intensification of swirl toward the drain axis. If, simultaneously, the meridional velocity scales as $u_s \sim Q/(2\pi Rh)$, then

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{u_\varphi}{Ru_s} \sim \frac{\ell}{R^2 u_s}, \qquad (220)$$

so that the shape of a material filament is determined by the joint evolution of $R(s)$, $h(s)$, $u_s(s)$, and $\ell(s)$.

6.6. Material Phase Transport and the Circulation Vector of the Layer.

The helical filaments may be represented as level sets of a material surface phase,

$$\Psi(s,\varphi,t) = \varphi - \Phi(s,t), \qquad \Psi = \Psi_0, \qquad (221)$$

transported by the surface flow according to

$$\frac{D\Psi}{Dt} = \frac{\partial\Psi}{\partial t} + \mathbf{v}_\Sigma\cdot\nabla_\Sigma\Psi = 0. \qquad (222)$$

Equation (222) is the precise statement that the helical structure is carried along with the surface flow, rather than being continuously regenerated and destroyed by transverse mixing.

Within the layer, the vorticity is predominantly aligned with the helical tangent direction,

$$\boldsymbol{\omega} \simeq \omega_\parallel \mathbf{T}_{\text{hel}} + \omega_n \mathbf{n}, \qquad |\omega_\parallel| \gg |\omega_n|, \qquad (223)$$

where

$$\mathbf{T}_{\text{hel}} = \frac{u_s\mathbf{e}_s + u_\varphi\mathbf{e}_\varphi}{\sqrt{u_s^2+u_\varphi^2}}. \qquad (224)$$

This motivates a local circulation vector of the layer, analogous to the microvortex circulation vector $\boldsymbol{\mu}_\alpha$ of Section 4,

$$\boldsymbol{\mu} = \Gamma(s)\,\mathbf{T}_{\text{hel}}. \qquad (225)$$

If the circulation carried by a material filament varies slowly,

$$\frac{D\Gamma}{Dt} \simeq 0, \qquad (226)$$

then

$$\frac{D\boldsymbol{\mu}}{Dt} \simeq \Gamma\,\frac{D\mathbf{T}_{\text{hel}}}{Dt}, \qquad (227)$$

so that the evolution of the layer's circulation vector is governed primarily not by destruction of the filament but by the rotation and compression of the helical tangent direction as matter descends the funnel.

6.7. Summary.

The wall of the kern can therefore be generated, rather than merely postulated, from the joint action of

radial–meridional drainage flow + conservation of angular momentum + a thin surface layer + material advection of helical lines

with the criterion for the emergence of a logarithmic spiral following directly from the velocity field,

$$\frac{u_\varphi}{u_s} \propto \frac{R}{s} \quad\Rightarrow\quad \frac{u_\varphi}{u_s} \approx \text{const on a locally conical surface}$$
$$\Rightarrow\ R(\varphi) = R_0 e^{k\varphi}. \qquad (228)$$

Thus, the helical wall of the funnel need not be interpreted as a Taylor–Couette-type cellular structure. In the advection-dominated regime, it may instead be represented as a thin material surface layer composed of stretched helical filaments whose projection onto the locally conical funnel surface approaches a family of logarithmic spirals.

7. Numerical Experiment.

The numerical experiment was performed using a parametric Python implementation (matched_vortex.py). The computational model reconstructs the internal helical filaments, their tangential transition through the outlet of the kern, and their subsequent evolution within the outer quasi-meridional shell. A wave-type correction is included to reproduce the spatial modulation of the outer flow. The calculated curves represent prescribed material trajectories consistent with the geometric and kinematic assumptions of the model; they are not obtained by direct numerical integration of the Navier–Stokes equations.

7.1. Outer Shell: An Oblate Spheroid with a Northern Depression.

The shell is parameterized by $\theta \in [0, \pi]$ (where $\theta = 0$ corresponds to the northern pole), $\varphi \in [0, 2\pi)$.

Its meridional profile is defined by

$\rho(\theta) = A \sin\theta\,(1 + 0.025\cos\theta),\ \ A = 2.55,$

$z(\theta) = C\cos\theta - D\,e^{-(\theta/W)^2},\ C = 2.18,\ D = 0.26,$

$W = 0.5.$

The factor $(1 + 0.025\cos\theta)$ introduces a slight asymmetric deformation of the shell in the polar direction, whereas the Gaussian term $D\,e^{-(\theta/W)^2}$ produces a shallow depression in the northern region.

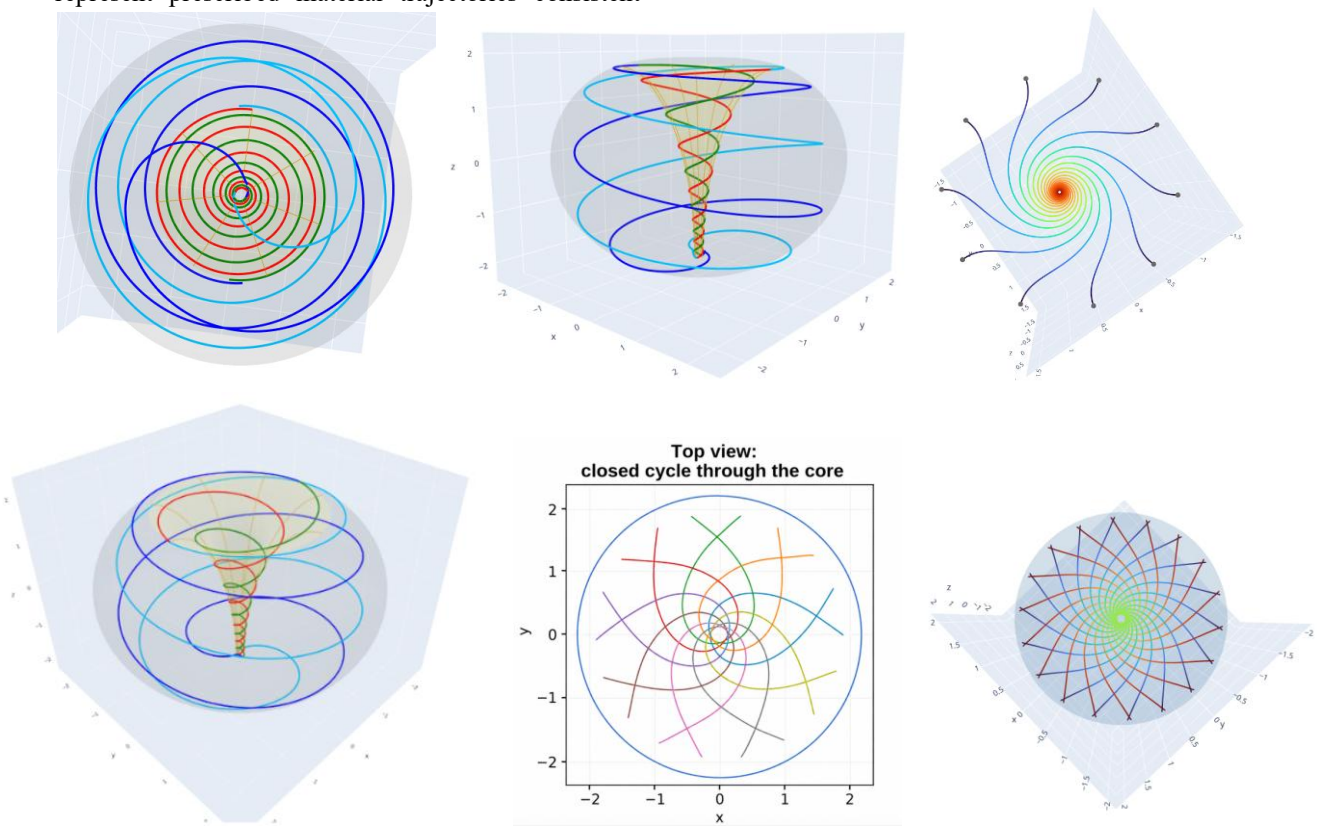

Fig. 2. Numerical visualization of the unified ellipsoidal vortex of the first kind with a central concave helical kern. The figure illustrates the parametric numerical model of the vortex developed in this work. (a) Top view of the internal helical filaments converging toward the central kern. The trajectories form logarithmic spiral patterns corresponding to the superposition of radial convergence and azimuthal circulation. (b) Three-dimensional view of the internal concave helical kern, showing the continuous winding of material filaments from the northern inlet toward the central outlet cross-section. (c) Local transverse flow in the vicinity of the outlet section. Streamlines represent the anisotropic sink–vortex solution, illustrating the spiral concentration of matter produced by the combined potential and rotational components of the velocity field. (d) Three-dimensional continuation of the material filaments after their tangential exit from the kern, demonstrating the transition from the internal helical transport to the outer vortex region. (e) Top view of the closed transport cycle through the kern. Each colored curve represents a continuous material filament that passes through the concave kern, leaves it tangentially, propagates through the outer vortex region, and returns toward the northern part of the vortex, forming a closed circulation loop. (f) Numerical visualization of the quasi-meridional outer shell generated by the family of outgoing filaments. The red radial segments indicate local meridional directions, while the colored spiral trajectories illustrate the gradual transition from tangential ejection to quasi-meridional transport under the action of the global rotation of the ellipsoidal vortex.

8. Conclusion.

A geometric and hydrodynamic model of a unified ellipsoidal vortex of the first kind has been developed, in which the central transport element is a concave helical kern embedded within the northern hemisphere of the vortex and having the form of a narrowing rotating funnel. Unlike cylindrical or symmetric two-ended models, the proposed kern possesses a wide northern inlet and a localized outlet cross-section situated near the geometric center of the vortex. To describe this structure, a conical helical coordinate system has been introduced, the surface and volume of the kern have been parametrized, a continuous family of material helical filaments with variable winding density has been constructed, and conditions for their smooth tangential continuation into the outer vortex region have been formulated.

It has been shown that the concave kern, the central outlet region, the southern free-transport region, and the outer quasi-meridional shell may be represented as a single continuous material transport system. Each outer filament is the direct continuation of the corresponding internal filament of the kern, while the transition through the outlet preserves the position and tangent direction of the filament and, under the assumed ideal circulation-preservation condition, its oriented circulation. The complete transport cycle is represented by [2-4, 6-7]:

$$K_N \to S_{\text{out}} \to \Omega_- \to S_h \to S_{\text{in},N} \to K_N.$$

Three distinct notions of filament chirality have been introduced: geometric chirality χ_{geom}, associated with the spatial trajectory of a filament; spin chirality χ_{spin}, determined by the sign of its material circulation; and dynamic chirality χ_{dyn}, determined by the local alignment of the velocity and vorticity fields. They are defined, respectively, through the geometry of the filament, the relation

$$\chi_{\text{spin}} = \operatorname{sgn} \Gamma,$$

and the local helicity density

$$h = \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega},$$

so that

$$\chi_{\text{dyn}} = \operatorname{sgn}(\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega}).$$

The geometric orientation of a filament relative to the global vortex axis may change in the turning region of the outer shell. In particular, the longitudinal component of the tangent vector may pass through zero and subsequently reverse its sign. Such a geometric turning does not imply reversal of the intrinsic circulation of the material filament. The principal chirality-preservation condition of the vortex of the first kind is therefore

$$\operatorname{sgn} \Gamma_\alpha = \chi_0, \qquad \forall \alpha,$$

where

$$\chi_0 \in \{-1, +1\}.$$

Equivalently,

$$\chi_{\text{spin},\alpha} = \chi_0 = \text{const}$$

throughout the material transport cycle.

The local formation of the concave kern has been described by a regularized sink–vortex flow. In the scaled transverse plane, the local velocity field is represented as

$$\mathbf{v}_\perp = -\frac{A}{R}\,\mathbf{e}_R + \frac{G}{R}\,\mathbf{e}_\varphi, \qquad A > 0, \quad G \neq 0.$$

Here A characterizes the strength of convergence toward the central outlet, whereas G characterizes the strength and orientation of the local circulation. The circulation is related to G by

$$\Gamma = 2\pi G,$$

and therefore

$$\operatorname{sgn} G = \operatorname{sgn} \Gamma.$$

The superposition of converging and azimuthal motion generates logarithmic-spiral trajectories,

$$R(\varphi) = R_0 \exp\left[-\frac{A}{G}(\varphi - \varphi_0)\right],$$

whose pitch is determined by the relative strength A/G of the converging and rotational components.

A direct relation between the local hydrodynamic field and the geometric winding of the material filaments has been obtained:

$$q_K(s) = \frac{v_\varphi(s)}{R_K(s)\, v_s(s)}.$$

For transport directed from the northern inlet toward the outlet, $v_s > 0$, this yields

$$\operatorname{sgn} q_K = \operatorname{sgn} G = \operatorname{sgn} \Gamma = \chi_{\text{spin}}.$$

This relation constitutes the principal connection between the geometric and hydrodynamic parts of the model: the direction of the helical winding of the kern filaments is consistent with the orientation of their material circulation.

The narrowing geometry of the kern also leads to an intensification of the transport toward the outlet. Conservation of mass gives, in the one-dimensional approximation,

$$v_s(s) = \frac{Q_K}{\rho \pi R_K^2(s)},$$

while, under the additional assumption of circulation conservation,

$$\Omega_K(s) \sim \frac{\Gamma}{2\pi R_K^2(s)}.$$

Thus, decreasing $R_K(s)$ increases both the characteristic longitudinal transport velocity and the characteristic angular velocity near the central outlet.

The wall of the concave kern has additionally been interpreted as an advection-dominated material helical surface layer rather than as a Taylor–Couette-type instability layer. Its spiral organization results from the combined action of radial-meridional drainage, azimuthal transport, material advection, and stretching of the surface layer. In the locally axisymmetric approximation, the competition between radial and azimuthal transport again produces logarithmic-spiral material trajectories, providing a kinematic mechanism for the formation and maintenance of the helical structure of the kern wall.

The oriented microvortex circulation vector

$$\boldsymbol{\mu}_\alpha = \Gamma_\alpha \mathbf{T}_\alpha$$

provides a compact representation of the rotational state transported by each material filament. Under tangential matching and circulation preservation at the outlet, this vector is continuously transferred from the internal kern filament to its continuation in the outer shell. Thus, the geometric construction of the kern, the local sink–vortex mechanism, the material surface-layer dynamics, and the preservation of the sign of circulation together provide a consistent description of a

continuous helical transport system connecting the central rotating funnel with the outer quasi-meridional vortex shell.

The proposed model provides a mathematical framework for further investigation of the dynamics and stability of unified ellipsoidal vortices. Natural extensions include the derivation of a self-consistent evolution equation for the velocity field, spectral analysis of perturbations of the kern and outer shell, quantitative investigation of viscous circulation decay, and determination of the parameter regimes in which the coherent kern–shell transport structure persists. The model may also provide a basis for comparison with double-kern and other classes of ellipsoidal vortex structures.

References

1. Milyute E., Milyus A. The Microvortex Circulation Vector as an Integral Characteristic of Coherent Vortex Filaments, NJD-iScience, 2026, 186

2. Milyute E. Derivative of the circulation invariant and preservation of the diffeomorphism of vortex filaments. Book of Abstracts, 2026 International Congress of Mathematicians, Philadelphia, Pennsylvania, USA

3. Milyus A. Modulation of the Vector Potential of the Core of an Elliptical Vortex of the Second Rank with the Distribution of Right- and Left-Handed Matter Flows. Book of Abstracts, 2026 International Congress of Mathematicians, Philadelphia, Pennsylvania, USA

4. Milyute E., Milyus A. A Mathematical Model of the Three-Dimensional Dynamics of a Returning Aerodynamic Boomerang. 2026. In print.

5. Milyute E., Milyus A. Radius-vector of the Vector Potential and its Connection with the Kern of an Ellipsoidal Vortex. NJD-iScience, 2024, 134, 30-37

6. Milyute E., Milyus A. Vortex Dynamics of Substance in an isolated spheroidal Vortex and its Relationship with a Charge. DIZZW, 2023, 48, 29-35

7. Milyute E. Investigation of Conformal Mappings in Solving Problems of Vortex Dynamics. 2023.

TECHNICAL SCIENCES

АРХИТЕКТУРНЫЕ МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УНИФИЦИРОВАННОГО ДОСТУПА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ К AI-УСКОРИТЕЛЯМ В ОБЛАЧНЫХ СРЕДАХ САМООБСЛУЖИВАНИЯ

Хлыстун М.А.
HPC Systems Administrator,
Fred DeMatteis School of Engineering and Applied Science, Hofstra University
Хемпстед, США
ORCID: 0009-0003-4686-2677

ARCHITECTURAL MODELS FOR ENSURING UNIFIED USER ACCESS TO AI ACCELERATORS IN SELF-SERVICE CLOUD ENVIRONMENTS

Khlystun M.
HPC Systems Administrator,
Fred DeMatteis School of Engineering and Applied Science, Hofstra University
Hempstead, USA
ORCID: 0009-0003-4686-2677
DOI: 10.5281/zenodo.22091683

Аннотация

В статье рассматриваются архитектурные модели обеспечения унифицированного доступа пользователей к AI-ускорителям в облачных средах самообслуживания. Анализируются особенности представления GPU, TPU и иных специализированных ускорителей как управляемого облачного ресурса. Раскрываются механизмы абстракции аппаратного уровня, формирования вычислительных профилей, контейнерной оркестрации, квотирования и автоматического выделения ресурсов. Особое внимание уделяется согласованию пользовательских запросов с состоянием кластера, типом AI-нагрузки и требованиями к доступности. Показано, что эффективная модель доступа предполагает перенос эксплуатационной сложности на платформенный уровень и позволяет предоставлять AI-вычисления как воспроизводимый, управляемый и предсказуемый облачный сервис.

Abstract

The article examines architectural models for ensuring unified user access to AI accelerators in self-service cloud environments. It analyses the representation of GPUs, TPUs and other specialised accelerators as managed cloud resources. The study considers mechanisms of hardware-level abstraction, computing profile formation, container orchestration, quota management and automated resource allocation. Particular attention is paid to aligning user requests with cluster state, AI workload type and availability requirements. It is shown that an effective access model requires transferring operational complexity to the platform layer and enables AI computing to be provided as a reproducible, manageable and predictable cloud service.

Ключевые слова: AI-ускорители, облачные вычисления, самообслуживание, аппаратная абстракция, оркестрация, GPU, автоматическое выделение ресурсов.

Keywords: AI accelerators, cloud computing, self-service, hardware abstraction, orchestration, GPU, automated resource allocation.

Introduction

The growing computational complexity of artificial intelligence (AI) models has increased the role of specialised AI accelerators in cloud infrastructure. Graphics processing units, tensor processing units and other hardware accelerators are increasingly treated not as isolated physical devices, but as managed computing resources delivered through self-service cloud platforms. However, their integration into cloud environments is constrained by hardware heterogeneity, high idle costs, user isolation requirements, competition for computing capacity and the need to coordinate interactive and batch AI workloads. Recent studies indicate that conventional scheduling approaches do not always ensure efficient GPU cluster utilisation for deep learning tasks, as they require more accurate consideration of workload profiles, latency requirements, memory allocation and permissible levels of resource sharing [1].

In this context, architectural models that provide unified user access to AI accelerators without direct interaction with the physical infrastructure layer become particularly important. Such models rely on an abstraction layer in which users request not a specific device, but a standardised computing profile defined by task type, memory capacity, performance level and availability policies. The combination of container orchestration, accelerator virtualisation, automated resource allocation, quota management and monitoring enables multi-tenant access while preserving operational control over the cloud platform [2]. The aim of this article is to systematise architectural models for unified access to AI accelerators in self-service cloud environments and to analyse mechanisms of hardware abstraction, automated resource allocation and AI computing availability without increasing operational complexity.

Main part. AI accelerators as a resource of self-service cloud infrastructure

In general, AI accelerators in cloud infrastructure represent a specialised class of computing resources designed for highly parallel operations, including matrix processing, neural network training, model inference and data-intensive analytics. In self-service cloud environments, these devices are no longer treated as locally assigned hardware, but as part of a shared computing pool managed through APIs, allocation policies and orchestration mechanisms. Therefore, an AI accelerator should be viewed not only as a hardware component, but also as a managed infrastructure unit associated with availability, isolation, scalability and consumption control [3].

The growing importance of AI accelerators is confirmed by market dynamics. According to recent estimates, the global AI accelerator market may reach approximately $71.4 billion by the end of 2026 and $339.6 billion by 2031 (fig. 1).

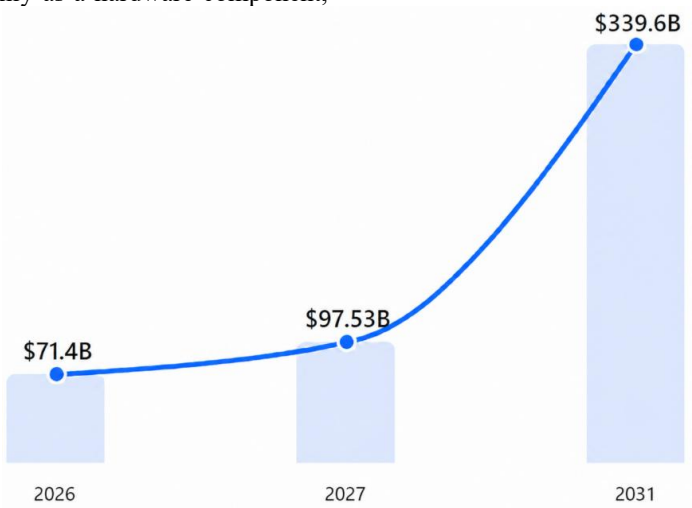

Figure 1. Projected growth of the global AI accelerator market, billion dollars [4].

This shows that accelerator-based computing is becoming not a narrow specialised field, but one of the key elements in the development of cloud and data centre infrastructure. At the same time, the growing infrastructural significance of AI accelerators increases the requirements for their integration into managed cloud environments. For self-service platforms, it is important not only to ensure the availability of such resources, but also to present them to users in a standardised form, where differences between accelerator types, usage modes and operational constraints are addressed at the platform architecture level (table 1).

Table 1

Technical parameters of AI accelerators as a managed cloud resource

Parameter	Technical relevance for cloud infrastructure	Architectural implication for self-service access
Accelerator memory capacity	Determines the ability to host large model weights, intermediate tensors and batch processing buffers.	Resource profiles should specify memory classes and prevent workloads from being scheduled on insufficient devices.
Interconnect bandwidth	Affects data exchange between accelerators during distributed training and large-scale inference.	The scheduler should consider node topology, high-speed links and accelerator locality.
Driver and runtime compatibility	Defines compatibility with CUDA, ROCm, TensorRT, XLA, PyTorch, TensorFlow and other execution stacks.	Standardised container images and version-controlled runtime environments are required.
Partitioning and sharing mode	Supports full-device allocation, Multi-Instance GPU, Multi-Process Service or time-sliced access.	The platform must enforce isolation, quotas and workload placement policies.
Workload suitability	Different accelerators are optimised for training, inference, fine-tuning, experimentation or data analytics.	The service catalogue should map workload types to appropriate accelerator profiles.
Telemetry availability	Provides metrics on utilisation, memory pressure, errors, temperature, power consumption and idle time.	Monitoring systems should support automated scaling, fault detection and resource reclamation.
Allocation granularity	Defines whether resources are assigned as whole devices, logical partitions or fractional accelerator units.	Self-service platforms should support flexible allocation without exposing low-level hardware details to users.

Unlike general-purpose CPU and memory resources, AI accelerators are less elastic and more sensitive to placement constraints. Their effective use depends not only on the amount of allocated compute capacity, but also on memory locality, accelerator topology, driver compatibility, interconnect bandwidth and the possibility of sharing or partitioning the device. For this reason, accelerator provisioning cannot be reduced to a simple increase or decrease in the number of instances. The platform must interpret each request in relation to workload type, execution mode and expected resource intensity.

This distinction is particularly important for mixed AI environments, where training, inference, fine-tuning and interactive experimentation may coexist within the same infrastructure pool. Training workloads often require sustained allocation and high memory capacity, while inference workloads depend more on latency, throughput and fast scaling. Interactive sessions, in turn, may produce long idle periods if the platform does not enforce lifecycle limits. Therefore, a self-service model for AI accelerators should combine resource profiling with workload classification, otherwise the same shared pool may become inefficient despite the formal availability of hardware capacity.

Thus, the heterogeneity of AI accelerators requires a shift from direct physical device selection to the use of standardised computing profiles. This approach separates the user request from low-level workload placement details and makes AI accelerators part of the cloud platform's service catalogue. However, inclusion in the service catalogue alone does not ensure stable access to accelerators; this also requires platform-level functions for resource registration, allocation, consumption control and return to the shared pool. The main functions of such management are presented in table 2.

Table 2

Platform-level functions for managing AI accelerators in self-service cloud environments

Function	Technical purpose	Role in self-service access
Device registration	Exposes accelerators to the orchestrator.	Makes resources visible for scheduling.
Resource discovery	Identifies available devices and partitions.	Supports automated selection of profiles.
Container binding	Attaches accelerators to workloads.	Enables controlled access from isolated environments.
Quota enforcement	Limits usage by user, project or tenant.	Prevents resource monopolisation.
Policy-based scheduling	Matches workloads with suitable devices.	Improves placement accuracy and utilization.
Automatic release	Returns idle or completed resources to the pool.	Reduces accelerator downtime.
Metrics collection	Tracks utilisation, memory, errors and latency.	Supports monitoring and optimisation.
Access control	Verifies permissions and tenant boundaries.	Maintains secure multi-user operation.

Overall, AI accelerators can function effectively in self-service cloud infrastructure only when they are integrated into a unified resource management model. Their value is determined not only by raw computing performance, but also by the platform's ability to abstract hardware complexity, allocate resources automatically, enforce isolation and return unused capacity to the shared pool. This makes accelerator access a managed cloud service rather than a manual infrastructure operation.

Hardware resource abstraction and unified user access models

Hardware resource abstraction is a key condition for integrating AI accelerators into self-service cloud platforms. In a traditional infrastructure model, users or administrators must consider node configuration, accelerator type, memory capacity, driver versions, library compatibility and network topology. In self-service cloud environments, this creates excessive operational complexity and reduces reproducibility. Therefore, modern access architectures introduce an intermediate abstraction layer that converts physical devices into standardised computing profiles. The user selects not a specific GPU or accelerator, but a resource type aligned with training, inference, model testing or interactive development tasks. This logic is especially relevant for LLM-based corporate SaaS environments, where model inference, context processing and generation tasks require predictable access to accelerator resources without exposing infrastructure complexity to the end user [5].

At the cloud platform level, this abstraction is implemented through virtualisation, containerisation, orchestration and resource policies. Containers separate the user environment from the physical node, while the orchestrator places workloads on available resources. In Kubernetes-based GenAI infrastructures, the device plugin framework enables vendors to expose GPUs, FPGAs, DPUs and other accelerators to the scheduler, allowing containers to request them in a portable form [6]. As a result, the accelerator is represented not as a unique device, but as a schedulable resource governed by common allocation and quota rules.

The relationship between the user request, the abstraction layer and the physical layer of AI accelerators can be represented as a layered architectural model (fig. 2).

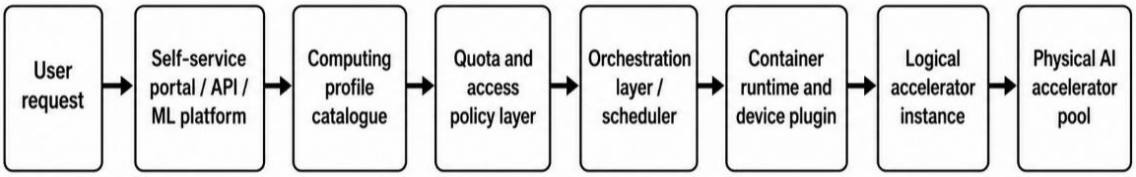

Figure 2. Layered model of hardware resource abstraction and unified access to AI accelerators.

As shown in fig. 2, unified access is formed through a sequence of platform layers rather than through direct allocation of a physical accelerator. The user interacts only with the service interface and the computing profile catalogue, while quota verification, workload placement, container binding and accelerator exposure are handled within the platform. This separation reduces dependence on infrastructure-specific knowledge and makes access to heterogeneous accelerator pools more reproducible. A similar platform logic is observed in digital service environments, where the quality of user experience depends on the ability of the platform to hide internal technological complexity behind standardised access scenarios and predictable interaction patterns [7].

Thus, hardware resource abstraction shifts AI accelerator access from a hardware-centred model to a platform-centred model. Its role is not limited to hiding technical complexity; it also establishes a unified interaction pattern between the user, the orchestration system and the physical accelerator layer. The higher the level of abstraction, the less the user is involved in operational details, while scheduling, monitoring, policy enforcement and resource allocation become critical platform functions. Therefore, unified access to AI accelerators should be understood as the result of coordinated interaction between hardware, virtualisation, orchestration, service and user-facing layers.

Mechanisms for automated allocation of AI accelerators in cloud platforms

Automated allocation of AI accelerators in a cloud platform converts a user request into a specific workload placement decision. At this stage, the key issue is not only whether an accelerator is available, but whether the system can match workload parameters with the current cluster state, queue structure, execution priorities and service-level requirements. This makes automated allocation a coordination mechanism between user-facing self-service access and the internal resource management logic of the platform. The main mechanisms of such allocation are presented in table 3.

Table 3

Mechanisms for automated allocation of AI accelerators in self-service cloud platforms [8, 9]

Mechanism	Technical purpose	Role in self-service cloud
Access validation	Checks whether a user or project can request accelerators.	Prevents unauthorised resource use.
Quota matching	Verifies allowed accelerator, memory and runtime limits.	Prevents monopolisation of scarce capacity.
Job queueing	Orders workloads when accelerators are unavailable.	Supports controlled resource distribution.
Priority policy	Differentiates experimental, batch and production tasks.	Accelerates critical AI workloads.
Placement scheduling	Matches workload requirements with nodes and accelerator types.	Improves placement accuracy and utilization.
Adaptive reallocation	Responds to load changes and cluster state.	Reduces idle time and improves flexibility.
Workload lifecycle control	Starts, tracks, terminates and releases resources.	Returns unused accelerators to the shared pool.
Consumption metrics	Records utilisation, memory, errors, runtime and idle periods.	Supports monitoring, billing and optimisation.

The practical configuration of these mechanisms depends on the type of AI workload. For model training, allocation decisions must account for expected execution time, checkpointing strategy, multi-GPU placement and the need to keep distributed jobs on nodes with suitable interconnects. Interruptions in such workloads may cause loss of progress or require additional recovery time, so the platform should combine queueing, priority rules and lifecycle control with predictable reservation policies.

For inference workloads, the allocation logic is different. The main constraints are latency, throughput stability, model loading time and the ability to release resources quickly when demand decreases. In this case, over-allocation increases operational cost, while under-allocation leads to SLO violations and degraded user experience. Therefore, automated allocation should not apply one universal rule to all AI tasks; it should distinguish between long-running training jobs, latency-sensitive inference services, batch analytics and temporary interactive sessions.

Overall, automated allocation transforms accelerator access into a managed platform process rather than a manual infrastructure operation. Its effectiveness depends on the consistency between access control, quota logic, scheduling decisions, workload monitoring and resource release. When these mechanisms operate as a single workflow, the platform can provide users with

predictable access to AI computing capacity while preserving control over utilisation, availability and operational cost.

Operational resilience and availability of AI computing without process complexity

The operational resilience of cloud AI infrastructure is determined not only by the reliability of hardware accelerators, but also by the platform's ability to maintain predictable access under changing workloads. This is especially important for self-service cloud environments, where users should receive a ready-to-use computing environment without manually configuring drivers, containers, network connections or placement policies. Therefore, AI computing resilience is formed through standardised environments, observability, automated scaling, idle resource control and failure recovery mechanisms.

The practical significance of standardisation is illustrated by MLPerf Inference, a global benchmark suite for evaluating the performance of machine learning systems during inference. MLPerf Inference Datacenter measures how quickly systems process input data and generate outputs using pre-trained models; MLCommons describes this benchmark suite as architecture-neutral, representative and reproducible. In MLPerf Inference v5.0, released in 2025, particular attention was given to LLM workloads and low-latency serving, reflecting the transition of AI infrastructure from isolated experimental runs to operational scenarios of large-scale inference [10]. For cloud platforms, such benchmarks are important not only for comparing accelerators, but also for verifying the reproducibility of hardware and software environments.

Another applied example concerns the availability of AI inference under variable demand. The HAS-GPU study, published in Euro-Par 2025 proceedings, proposed a hybrid autoscaling model for serverless inference with fine-grained GPU allocation. The approach combines horizontal and vertical scaling and allocates GPU Streaming Multiprocessor partitions and time quotas with higher granularity. Experiments showed that, compared with a mainstream serverless inference platform, the proposed architecture reduced average function cost by 10.8 times while maintaining more stable SLO compliance; compared with a state-of-the-art spatio-temporal GPU sharing framework, it reduced SLO violations by 4.8 times and cost by 1.72 times [11]. This example shows that the availability of AI computing depends not only on the number of accelerators, but also on the platform's ability to redistribute them accurately between workloads.

Thus, the operational resilience of AI computing in self-service cloud environments is ensured by a combination of standardised environments, reproducible benchmarks, SLO-aware autoscaling, fine-grained allocation and resource release policies. The user interacts with the AI accelerator as a managed cloud service rather than as a physical device. This model preserves access to high-performance computing without increasing manual administration, because control over utilisation, latency, failures, cost and workload lifecycle is transferred to the platform layer.

Conclusion

The analysis shows that unified user access to AI accelerators in self-service cloud environments is formed through the coordinated interaction of several architectural layers: the accelerator hardware pool, resource abstraction layer, container and orchestration infrastructure, automated scheduling mechanisms, quota management, monitoring and operational control policies. In this model, AI accelerators are no longer treated as separate physical devices requiring manual administration. Instead, they become standardised cloud resources delivered through computing profiles, service catalogues and programmatic interfaces.

The effectiveness of this architecture depends on the balance between user accessibility and platform manageability. The higher the level of automation and abstraction, the less the user is involved in infrastructure details. However, the importance of mature scheduling, telemetry, workload isolation, lifecycle control and resource release policies increases. Therefore, the future development of cloud AI platforms is associated not only with expanding the number of GPUs, TPUs and other accelerators, but also with the transition to a service-based model of AI computing, where hardware complexity is hidden at the platform level and users receive reproducible, manageable and predictable access to high-performance computing without additional operational complexity.

References

1. Ye Z., Gao W., Hu Q., Sun P., Wang X., Luo Y., Zhang T., Wen Y. Deep learning workload scheduling in GPU datacenters: A survey. *ACM Computing Surveys*. 2024;56(6):146. DOI: 10.1145/3638757.

2. Lee M., Seong S., Kang M., Lee J., Na G.-J., Chun I.-G., Nikolopoulos D., Hong C.-H. ParvaGPU: Efficient spatial GPU sharing for large-scale DNN inference in cloud environments. *IEEE*. 2024:1-14.

3. Huang J., Lin W., Wu W., Wang Y., Zhong H., Wang X., Li K. On efficiency, fairness and security in AI accelerator resource sharing: A survey. *ACM Computing Surveys*. 2025;57(9):1-35.

4. AI Accelerators Market – Strategic Insights and Forecasts (2026-2031). *Knowledge Sourcing Intelligence*. URL: https://www.knowledge-sourcing.com/report/ai-accelerator-market (Accessed June 5, 2026).

5. Miloserdov A. Architectural approaches to integrating LLM models into corporate B2B SaaS systems. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2026;(53):91-101.

6. Malleni S. S., Sevilla R., Vasilevskii A., Lema J. C., Bauer A. Evaluating Kubernetes performance for GenAI inference: From automatic speech recognition to LLM summarization. *Proceedings of the 17th ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering*. 2026:135-146. DOI: 10.1145/3777884.3796983.

7. Kovalevskyi K. The impact of digital platforms on the transformation of user experience in the banking sector. *Professional Bulletin: Information Technology and Security*. 2025;(4):66-73.

8. Kaur R., Asad A., Al Abdul Wahid S., Mohammadi F. A survey of advancements in scheduling techniques for efficient deep learning computations on GPUs. *Electronics*. 2025;14(5):1048.

9. Sanjalawe Y., Al-E'mari S., Fraihat S., Makhadmeh S. AI-driven job scheduling in cloud computing. *Artificial Intelligence Review*. 2025;58:197. DOI: 10.1007/s10462-025-11208-8.

10. MLCommons Releases New MLPerf Inference v5.0 Benchmark Results. *MLCommons*. URL: https://mlcommons.org/2025/04/mlperf-inference-v5-0-results/ (Accessed June 11, 2026).

11. Gu J., Wang P., Núñez Araya I. D., Huang K., Gerndt M. HAS-GPU: Efficient hybrid auto-scaling with fine-grained GPU allocation for SLO-aware serverless inferences. In: *Euro-Par 2025: Parallel Processing. Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer; 2025:159-174. DOI: 10.1007/978-3-031-99854-6_11.

АНАЛИЗ ЗАДЕРЖЕК И ВАРИАТИВНОСТИ ОТКЛИКА СЕРВИСОВ НА LINUX-ПЛАТФОРМАХ

Откидач И.И.
ООО «ВБ ТЕХ», инженер DevOps
ORCID ID: 0009-0009-7395-7843

ANALYSIS OF LATENCY AND RESPONSE VARIABILITY OF SERVICES ON LINUX PLATFORMS

Otkidach I.
WB Tech LLC, DevOps Engineer
ORCID ID: 0009-0009-7395-7843
DOI: 10.5281/zenodo.22091693

Аннотация

В данной статье исследуется проблема возникновения нестабильных задержек и вариативности отклика сервисов, функционирующих на Linux-платформах. Изучается влияние системных механизмов операционной системы на предсказуемость выполнения приложений. Анализируются сетевые факторы, влияющие на время отклика, в том числе обработка входящих и исходящих пакетов, работа сетевых очередей, буферизация данных, распределение сетевой нагрузки между процессорными ядрами и влияние сетевого стека на выполнение прикладных сервисов. Особое внимание уделяется различию между средними значениями задержки и предельными выбросами времени отклика. Рассматриваются подходы к снижению вариативности отклика, включая изоляцию вычислительных ресурсов, управление обработкой системных событий, оптимизацию сетевых очередей и другие методы.

Abstract

This article investigates the problem of unstable latency and response-time variability in services running on Linux platforms. It examines the influence of operating system mechanisms on the predictability of application execution. It analyzes network-related factors affecting response time, including the processing of incoming and outgoing packets, the operation of network queues, data buffering, the distribution of network load across processor cores, and the impact of the Linux network stack on application-level service execution. Particular attention is paid to the distinction between average latency values and extreme response-time spikes. It also considers approaches to reducing response variability, including computational resource isolation, control of system event processing, optimization of network queues, and other methods.

Ключевые слова: задержка отклика, вариативность задержек, Linux-платформа, планировщик задач, сетевой стек, детерминированное поведение, высокопроизводительные приложения.

Keywords: response latency, latency variability, Linux platform, task scheduler, network stack, deterministic behavior, high-performance applications.

Introduction

Modern Linux platforms are widely used to host high-performance server, network, and application services. For these services, not only throughput and average operation time are important, but also response stability. Under intensive load, even short delays may reduce the quality of service, violate time limits, and make system behavior less predictable. At the same time, the average latency value does not always reflect the real behavior of a service, because rare but significant response-time spikes are often critical.

Latency variability in Linux is formed under the influence of many related factors. At the operating system level, task scheduling, context switching, system event processing, interaction between user space and the kernel, memory management, and background activity of system processes play an important role. For network services, the Linux network stack becomes an additional source of instability. This includes processing of incoming and outgoing packets, buffering, queue operation, distribution of network load across processor cores, and competition for computing resources. The goal of this research is to analyze the causes of unstable latency and response variability of services on Linux platforms, as well as to consider network factors and approaches aimed at improving the deterministic behavior of the system.

Main part. Causes of unstable latency on Linux platforms

Unstable latency on Linux platforms is a result of the fact that Linux was originally designed as a general-purpose multitasking operating system. It is focused on efficient resource sharing between a large number of processes, rather than on strictly guaranteed response time. For high-performance and latency-sensitive applications, not only the average speed of an operation is important, but also the predictability of response time.

In this context, response latency can be understood as the time between the occurrence of an event and the moment when the corresponding thread or service actually starts to process it. For a user application, this may be the time between the arrival of a network packet and the start of its processing, between a timer event and the wake-up of a thread, etc. In studies of real-time Linux systems, the term scheduling latency is often used. It means the difference between the expected wake-up time of a thread and the actual moment when it resumes execution. The cyclictest tool, which is

widely used for such measurements, evaluates exactly this difference: a thread sets a timer, goes to sleep, and after wake-up calculates the difference between the planned and the actual activation time [1].

One of the main causes of unstable latency **is the operation of the task scheduler**. In standard Linux configurations, the scheduler must provide fair distribution of processor time between competing tasks. This means that the thread of a latency-sensitive application may compete for Central Processing Unit (CPU) time with other user processes, kernel threads, interrupt handlers, and background services. Even if the average system load seems acceptable, the short-term appearance of a higher-priority task or an already running task may delay the execution of the required thread.

For services operating under high load, not only the scheduling algorithm itself is important, but also the state of the run queue. If several runnable threads are located on one core at the same time, the application thread may be ready for execution but may not receive processor time immediately. As a result, latency appears that is not related to the logic of the application itself. In one of the studies [2], a standard Linux 6.6.21 kernel and a kernel with PREEMPT_RT were compared on a Raspberry Pi 5 under high load created by stress-ng and iperf3. In the experiment, four real-time tasks were woken up every 100 μs for one hour, while the system reached 100% CPU load and about 70% Random Access Memory (RAM) load (table 1).

Table 1

Comparison of the standard Linux kernel and PREEMPT_RT kernel in terms of scheduling latency

Parameter	Standard Linux kernel	Linux with PREEMPT_RT	Interpretation
Average scheduling latency	14.69 μs	5.91 μs	PREEMPT_RT reduced the average scheduling latency by approximately 2.49×.
Max. observed scheduling latency	36,802.00 μs	124.00 μs	The maximum observed latency was approximately 294× lower with PREEMPT_RT.
Standard deviation	122.08 μs	3.25 μs	The substantially lower dispersion indicates more predictable timing behavior.
Experimental conditions	Stock Linux kernel on Raspberry Pi 5 under CPU/I/O and network stress	PREEMPT_RT-patched Linux kernel on the same platform.	Under concurrent stress-ng and iperf3 load. The system reached 100% CPU load and about 70% RAM load.
Wake-up period of real-time tasks	100 μs	100 μs	Cyclictest periodically woke four real-time tasks every 100 μs for one hour.

Note: The authors report 124.00 μs in Table I for the real-time kernel maximum and refer to 125 μs in the results text, which appears to be a rounded value.

A significant factor is the **difference between average and maximum latency values**. Average latency may remain at the level of a few microseconds, while single spikes may reach milliseconds or tens of milliseconds. For ordinary web services, this may appear as an increase in tail latency, that is, latency at the upper percentiles of the distribution. For control systems, network gateways, financial applications, telecommunication systems, or industrial automation, even rare spikes may violate response-time requirements.

The second important cause of unstable latency is **related to the interaction between user space and the kernel**. Any system call, access to the file system, network stack, memory, or driver switches execution from user space to kernel space. At this moment, the thread becomes dependent on the state of the kernel, locks, queues, interrupt handlers, and internal synchronization mechanisms. If an application often performs system calls, actively works with the network, creates threads, latency may depend not only on the application code, but also on the current state of the kernel.

The third source of variability is **related to hardware and power management mechanisms**. Modern processors dynamically change their frequency, switch to power-saving states, and use complex power management mechanisms. From the point of view of throughput, this is often useful, because the system saves energy under low load and increases frequency when needed. However, from the point of view of determinism, such transitions create additional uncertainty. Exiting a deep C-state takes time, and CPU frequency changes may add jitter. Linux documentation on CPU isolation directly states that CPU frequency changes can cause subtle forms of jitter, and deep C-states may lead to wake-up latency problems. In x86 systems, firmware-originating interrupts, such as system management interrupts, may be an additional source of unpredictability, because they are executed outside the normal control of the operating system [3].

The fourth cause is related to **hardware multithreading and shared processor resources**. Even if an application is pinned to a specific logical CPU, it may share the same physical core with another thread when Simultaneous Multithreading (SMT) or Hyper-Threading is enabled. In this case, the neighbouring thread may affect access to execution units, caches, buffers, and other on-chip resources. Therefore, for tasks where minimal response variability is important,

it is often recommended to disable SMT or avoid placing a critical thread on the same physical core together with non-critical workload.

The fifth group of causes is **related to periodic system activities of the kernel itself**. Even if a user application runs on a dedicated CPU, the operating system may periodically perform service operations: scheduler ticks, Read-Copy-Update (RCU) callbacks, timer processing, kernel threads, and housekeeping tasks. The NO_HZ_FULL mechanism is designed to reduce the number of scheduling-clock interrupts on a CPU where only one runnable task is running. Linux documentation notes that disabling unnecessary ticks can improve worst-case response time by an amount corresponding to the maximum duration of a scheduling-clock interrupt [4].

The sixth important sources of latency are interrupts and **deferred execution**. When a device, for example a network adapter, generates an interrupt, the processor has to handle this event. In the standard kernel, part of the work is performed in the context of a hardware interrupt or softirq, which may delay user threads. In PREEMPT_RT, many handlers are moved to a threaded context.

For network services, the Linux network stack is a particularly important source of instability. During data reception and transmission, many components are involved: the Network Interface Card (NIC) driver, hardware and software queues, direct memory access, interrupts, softirq, copying of data between kernel space and user space, Transmission Control Protocol / Internet Protocol (TCP/IP) processing, buffering, and scheduling of the user thread. Modern high-speed networks change the nature of bottlenecks. One CPU core is no longer able to process packets at line rate, and copying data from kernel buffers to application buffers becomes a key limitation. In the best case, for one long flow, the Linux stack reached about 42 Gbps throughput per core, while data copying took more than 50% of CPU cycles (fig. 1).

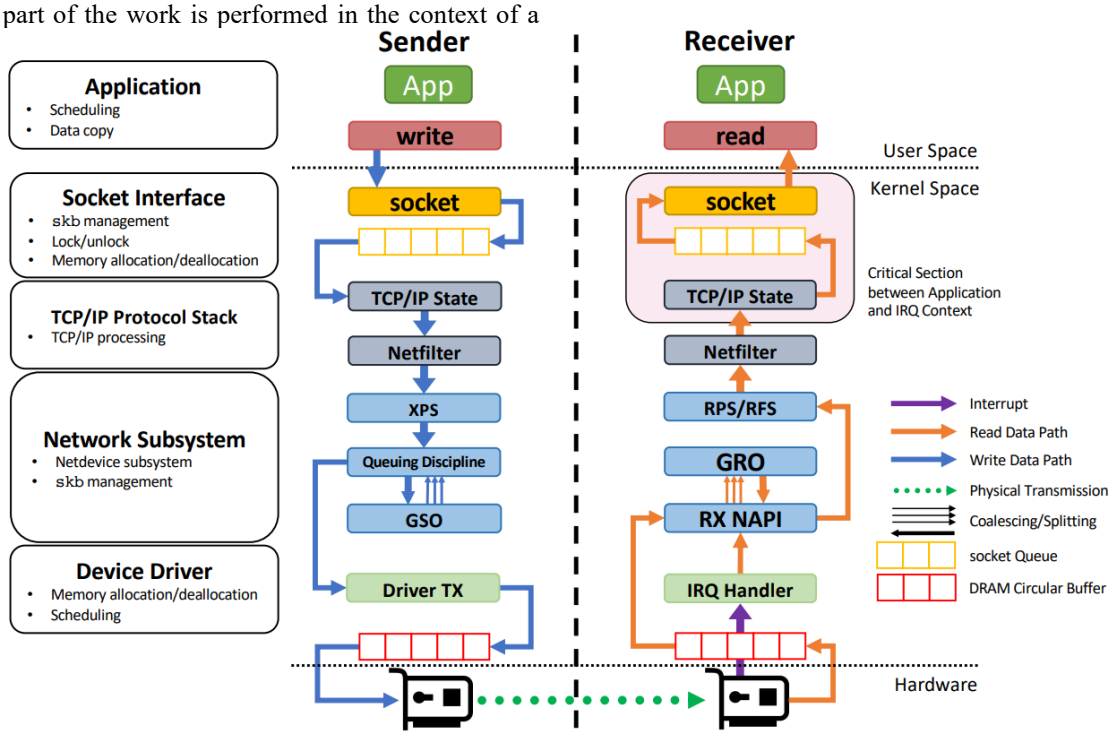

Figure 1. Architecture of data processing on the sender and receiver sides in the Linux network stack [5].

The seventh cause is **related to locks and critical sections inside the kernel**. If kernel code holds a lock or executes a section that cannot be interrupted immediately, a high-priority thread may have to wait until this operation is completed. PREEMPT_RT reduces the number of such non-preemptible sections, but it does not make Linux a fully hard real-time system.

The eighth factor is **system overload**. When the total demand for CPU time is higher than the available computing resources, latency becomes unavoidable. In a real-time environment, overload must be prevented at the architectural level, because the scheduler cannot execute all tasks at the same time. If a service runs together with CPU-intensive tasks, active input/output operations, or network stressors, latency may increase sharply.

The ninth cause is related to the measurement methodology. Unstable latency cannot be correctly evaluated only by the average value. It is necessary to analyze maximum values, standard deviation, latency distribution, percentiles, and the conditions under which spikes occur. The timerlat study emphasizes the limitation of “black-box” tools such as cyclictest. It shows the fact of latency, but does not explain its structure. Timerlat, in contrast, separates latency into components related to Interrupt Request (IRQ), thread latency, and user latency. In one of the analyzed examples, timerlat records a thread latency of 52.05 µs with a threshold of 30 µs (fig. 2).

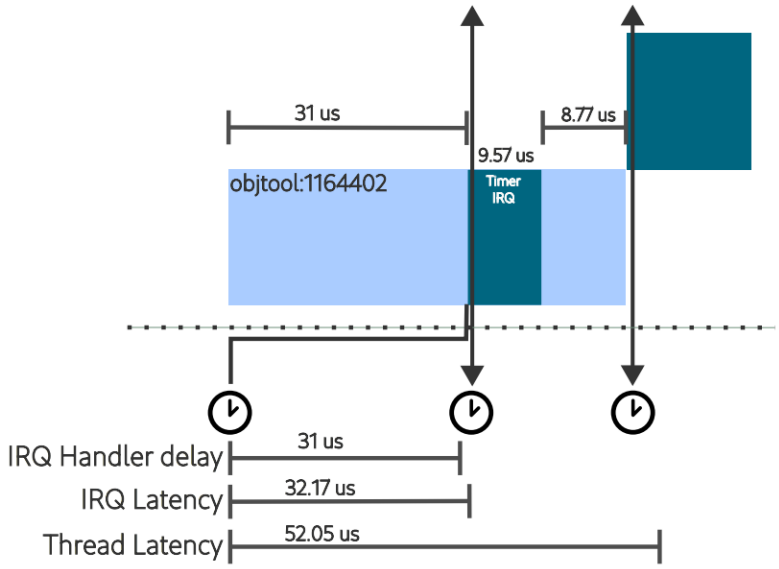

Figure 2. Temporal structure of latency identified by the Timerlat tool [6].

Thus, unstable latency on Linux platforms is formed as a combined effect of several levels: the task scheduler, thread competition, system calls, memory operation and others. Linux can provide very low latency with proper configuration, especially when kernel preemption, processor placement, memory locking, and sources of system jitter are controlled. However, by default Linux remains a general-purpose system, where high average performance does not mean deterministic behavior.

Analysis of network factors and approaches to ensuring deterministic behavior

Linux network subsystem is one of the most important sources of response variability in services, because network traffic processing affects several system levels at once. Unlike computational workload, where latency is often determined by the execution time of code on the CPU, network response depends on a sequence of asynchronous events. A packet must be received by the network card, placed in memory, passed to the driver, processed by the kernel, delivered to the socket buffer, and after that the user thread must be woken up and receive processor time.

For Linux services, it is especially important to distinguish between average network performance and deterministic processing. High throughput does not mean stable response time. A system may transmit tens of gigabits per second, but still show unstable latency at the upper percentiles of the distribution.

The first network factor of **instability is the interrupt handling mechanism**. When a network adapter receives a packet, it notifies the processor about this event. With a high intensity of incoming traffic, a direct interrupt for each packet would create excessive CPU load. Therefore, Linux uses NAPI, a mechanism that combines event-based and polling-based processing of network devices [7]. In the basic scheme, the device notifies the host about new events through an interrupt, after which the kernel schedules a NAPI instance for packet processing.

The second factor is **softirq processing and the distribution of network load across cores**. After the initial notification from the device, a significant part of network processing is performed not directly in the user application, but in the kernel context. If packet processing, softirq, and the user thread are located on the same CPU, they start competing for processor time.

Linux provides several mechanisms for scaling network processing on multiprocessor systems. These include Receive Side Scaling (RSS), Receive Packet Steering (RPS), Receive Flow Steering (RFS), accelerated RFS, and Transmit Packet Steering (XPS). RSS is implemented at the network adapter level and distributes incoming flows across hardware receive queues, usually using a hash based on packet fields (table 2).

Table 2

Linux network stack scaling mechanisms and their impact on latency [8, 9]

Mechanism	Purpose	Potential benefit	Risk to deterministic behavior
RSS	Hardware-based distribution of incoming flows across receive queues.	Increases parallelism in packet processing.	Poor IRQ-to-CPU distribution may increase jitter.
RPS	Software-based distribution of incoming packets across CPUs.	Useful when the number of hardware queues is limited.	May introduce additional inter-core packet movement.
RFS	Directs packet processing toward the CPU where the consuming application runs.	Improves cache locality.	Requires correct tuning and stable thread placement.
XPS	Selects a transmit queue based on the CPU that sends the packet.	Improves locality during packet transmission.	Incorrect binding may overload individual queues.

The third factor is **buffering and queues**. A network packet in Linux passes through several levels of queues: hardware queues of the network adapter, driver ring buffers, the NAPI budget, qdisc queues, socket buffers, and queues in the user application. Queues help smooth short traffic bursts and increase throughput, but from the point of view of latency they are a source of waiting. The larger the buffer, the better the system can handle bursts, but the higher the potential latency when packets accumulate.

The fourth factor is **the cost of copying data between the kernel and user space**. In the traditional model, receiving network data includes placing a packet in memory, processing it in the kernel, and then copying the data to the application buffer when read operations from the socket are performed. For small packets, the overhead of processing each packet plays an important role, while for large flows, the main cost is copying and moving data through memory.

The fifth factor is **related to the transmission mode and packet size**. Small packets create a high packet rate, that is, a large number of events per unit of time. Even if the total amount of data is not large, a large number of packets increases the load on the driver, NAPI, softirq, protocol stack, and scheduler. Large packets, on the contrary, put more load on the memory and copying subsystem.

The sixth factor is **the interaction between network processing and the task scheduler**. Even if the packet has already been processed by the kernel and the data is available in the socket buffer, the user thread must be woken up and started on the CPU. If this CPU is busy with another task, IRQ processing, softirq, or a kernel thread, the service will receive control later.

The seventh factor is **NUMA architecture**. On multi-socket servers, the network adapter is physically closer to one NUMA node. If IRQs, network queues, and the application are placed on CPUs of another NUMA node, data may pass through an inter-socket connection. For high-performance network services, it is important to place the application thread, network queue, and memory as close to each other as possible.

The eighth factor is **offload mechanisms of network adapters**. Modern NICs can perform part of the work that would otherwise be done by the kernel: checksum offload, TCP segmentation offload, generic receive offload, large receive offload, receive side scaling, and other functions. These mechanisms can reduce CPU overhead and increase throughput. However, they can also change the latency profile.

The ninth factor is **the kernel mode and the ability to preempt system handlers**. In standard Linux, part of kernel execution may delay user threads, especially if the system is busy processing interrupts, softirq, or non-preemptible sections of code. PREEMPT_RT changes this model by moving a significant part of interrupt processing to a threaded context and increasing the predictability of preemption.

One practical approach to improving deterministic behavior is to divide CPUs by role. Some cores are allocated for housekeeping tasks, system threads, RCU callbacks, timers, and processing of non-critical interrupts, while separate CPUs are reserved for critical service threads (table 3).

Table 3

Approaches to ensuring deterministic network response

Approach	System-level scope of application	Impact on response-time determinism	Limitations
CPU isolation	Reserves selected CPU cores for latency-critical threads and separates them from general system activity.	Reduces interference from scheduler activity, kernel threads, timers, and unrelated workloads.	Requires housekeeping CPUs and coordination with interrupt, timer, and kernel-thread placement.
IRQ affinity	Assigns network interrupts to selected CPU cores according to the service and traffic profile.	Prevents uncontrolled interrupt handling on critical CPUs.	Incorrect placement may overload cores or reduce cache locality.
PREEMPT_RT	Uses a real-time Linux kernel with higher kernel preemptibility and threaded interrupt handling.	Reduces worst-case scheduling latency and makes interrupt and softirq processing more controllable.	Does not make Linux a hard real-time system and still requires priority management.
Buffer and queue control	Tunes socket buffers, NIC ring buffers, queuing disciplines, backlog limits, and application queues.	Limits packet accumulation and helps control tail latency under bursty or overloaded traffic.	Small buffers may increase packet drops.

Thus, network-related factors of unstable latency in Linux are connected not only with the physical transmission of data, but also with how the kernel distributes packet processing across CPUs, how interrupts and softirq work, how queues are organized, how many times data is copied between system layers, where application threads are placed, and how well critical computing resources are isolated.

Conclusion

Unstable latency on Linux platforms is formed under the influence of a combination of system and hardware factors. Response predictability is affected by the task scheduler, system event processing, memory operation, background processes, processor power modes, interrupts, and the specific features of interaction between user space and the kernel. For network services, the Linux network stack, queues, buffering, distribution of network load across processor cores, and the cost of packet processing are also important. Therefore, response latency cannot be considered only as a characteristic of application code. It is the result of interaction between the application, operating system, network subsystem, and hardware platform.

Ensuring more deterministic behavior of Linux services requires a complex approach to system configuration and monitoring. Computational resource isolation, control of system event processing, correct distribution of network load, optimization of queues and buffers, reduction of background kernel activity, control of power-saving mechanisms, and analysis of not only average but also maximum latency values are important. The most informative indicators for evaluating response stability are latency distributions, upper percentiles, and rare peak spikes, since they determine the actual predictability of high-performance and latency-sensitive services.

References

12. Zhang J., Wang K. Research on real-time scheduling optimization and performance enhancement in embedded Linux. *2025 10th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP)*. IEEE. 2025:644-647.

13. Dewit W., Paolillo A., Goossens J. A preliminary assessment of the real-time capabilities of Real-Time Linux on Raspberry Pi 5. *18th Annual Workshop on Operating Systems Platforms for Embedded Real-Time Applications*. 2024. URL: https://antonio.paolillo.be/publications/workshops/ecrtsOspert2024_dewit_rtlinux_paper.pdf (Accessed May 2, 2026).

14. CPU Isolation. *Linux Kernel Documentation*. URL: https://docs.kernel.org/admin-guide/cpu-isolation.html (Accessed May 5, 2026).

15. NO_HZ: Reducing Scheduling-Clock Ticks. *Linux Kernel Documentation*. URL: https://docs.kernel.org/timers/no_hz.html (Accessed May 7, 2026).

16. Cai Q., Chaudhary S., Vuppalapati M., Hwang J., Agarwal R. Understanding host network stack overheads. *Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM Conference*. 2021:65-77.

17. De Oliveira D.B., Casini D., Lelli J., Cucinotta T. Timerlat: Real-time Linux scheduling latency measurements, tracing, and analysis. *IEEE Transactions on Computers*. 2025;74(8):2608-2620. DOI: 10.1109/TC.2025.3566908

18. Molè M., Shahinfar F., Tranquillo F.M., Zoni D., Panda A., Antichi G. Performance implications at the intersection of AF_XDP and programmable NICs. *Proceedings of the 3rd Workshop on eBPF and Kernel Extensions*. 2025:1-7.

19. Helbig M., Kim Y. IAPS: Decreasing software-based packet steering overhead through interrupt reduction. *2025 International Conference on Information Networking (ICOIN)*. IEEE. 2025:127-130.

20. Jang J., Hwang J. Optimizing receive flow steering for mixed traffic in high-performance cloud datacenters. *2025 IEEE 18th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*. IEEE. 2025:420-429.

МОДЕЛЬ ЕМПІРИЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ У СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОЇ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Поляков Б.А.
провідний інженер-програміст, м. Київ, Україна
Пашко А.О.
професор кафедри теоретичної кібернетики, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

MODEL OF EMPIRICAL CONSTRAINTS ON DESIGN DECISIONS IN AUTOMATED SOFTWARE DEVELOPMENT SYSTEMS

Poliakov B.
Lead Software Engineer, Kyiv, Ukraine
Pashko A.
Professor of the Department of Theoretical Cybernetics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
DOI: 10.5281/zenodo.22091709

Анотація

Розглядається стійкий режим відмови засобів автоматизованої генерації програмного коду на основі великих мовних моделей: формально коректні рішення, що не суперечать специфікації, документації та наявному коду, відхиляються через емпіричні обмеження, не зафіксовані в жодному документі. Запропоновано модель емпіричного обмеження як структури ⟨твердження, область дії, підстава, походження⟩ та класифікацію режимів відмови за статусом спростовника в момент ухвалення рішення. Означено задачі системи накопичення й застосування таких обмежень та обґрунтовано розділення подання знань і перевірки рішень. Запропоновано дворівневу систему метрик оцінювання якості системи та процедури оцінювання точності її компонентів, зокрема причинну процедуру встановлення факту використання поданого обмеження.

Abstract

The paper considers a persistent failure mode of LLM-based code generation tools: formally correct solutions that contradict neither the specification, nor the documentation, nor the existing code are nevertheless rejected due to empirical constraints not recorded in any document. A model of an empirical constraint as a structure ⟨statement, scope, ground, provenance⟩ is proposed, together with a classification of failure modes by the status of the defeater at decision time. The tasks of a system that accumulates and applies such constraints are defined, and the separation of knowledge supply from decision checking is justified. A two-level system of quality metrics is proposed, together with procedures for assessing the accuracy of its components, including a causal procedure for establishing the fact of use of a supplied constraint.

Ключові слова: великі мовні моделі, автоматизована розробка програмного забезпечення, емпіричні обмеження, спростовне міркування, накопичувальна пам'ять агентів, метрики якості, калібрування оцінок.

Keywords: large language models, automated software development, empirical constraints, defeasible reasoning, agent memory, quality metrics, confidence calibration.

Постановка проблеми. Засоби автоматизованої генерації програмного коду на основі великих мовних моделей увійшли до промислової практики розробки. Разом із цим виявився стійкий режим відмови, який не усувається ані підвищенням якості моделей, ані розширенням контекстного вікна.

Суть його така. Засіб генерує рішення, яке є формально коректним: воно не суперечить ані технічному завданню, ані документації, ані наявному коду, ані результатам статичного аналізу. Проте значна частка таких рішень відхиляється — на етапі узгодження плану, під час рецензування змін або в ході налагодження. Причиною є обмеження, які не зафіксовані в жодному документі: наслідки минулих інцидентів, неявні архітектурні конвенції, недокументована або оманлива поведінка інструментів і їхніх поєднань, обмеження масштабування, домовленості, що існують лише в пам'яті команди.

Проблему зафіксовано в літературі. Показано, що наявні метрики оцінювання згенерованого коду є репозиторій-агностичними та локально визначеними й тому не вловлюють системо-специфічних конвенцій — механізмів розширення, неявних правил шарування, доменних зон відповідальності модулів; як наслідок, два фрагменти коду з ідентичними значеннями метрик можуть суттєво відрізнятися архітектурною прийнятністю [16]. Окремо показано ефект деградації за накопичення структурних вимог: із зростанням кількості обмежень, які потрібно одночасно врахувати, якість роботи агентів суттєво падає [3].

У термінах некласичної логіки описана ситуація є класичною: з бази знань виводиться рішення X, виведення коректне, але існує твердження d, відсутнє в базі, за наявності якого X стає неприйнятним. Такі твердження називають спростовниками (defeaters), а відповідний тип виведення — спростовним (defeasible) [4; 23].

Очевидне розв'язання — записати всі відомі обмеження до інструкцій засобу генерації — не

працює з двох незалежних причин. Перша — обсяг: множина емпіричних обмежень зростає з віком і розміром системи та швидко перевищує розумний бюджет контексту, а зі зростанням обсягу інструкцій якість дотримання кожної окремої вимоги знижується [3]. Друга — природа міркування: спростовна інформація — це не додаткові факти, а винятки, що скасовують коректні виведення. Експериментально показано, що моделі формулюють коректні принципи, але ненадійно їх застосовують, причому джерелом відмови є не доступ до знань, а їх виконання [19]; окремо встановлено, що використання поданої інформації залежить від її розташування в контексті [13].

Попередній аналіз журналів сесій автоматизованої розробки дає підстави для додаткової гіпотези: частина порушених обмежень була виявною наперед — вони містилися в документації платформи, у попередніх записах того самого проєкту або в самій кодовій базі на момент ухвалення рішення. Для таких випадків збільшення повноти постачання знань не дає ефекту за побудовою: знання були доступні й не були застосовані.

Отже, потрібне не збільшення обсягу інструкцій, а система, яка накопичує обмеження зі спостережень за процесом розробки, оцінює їх достовірність і чинність та подає в кожній конкретній ситуації лише ті з них, що здатні скасувати саме поточне рішення, — і, окремо від подання, перевіряє кандидатну дію на суперечність цим обмеженням до того, як дія набуде наслідків. Побудова такої системи потребує, по-перше, формальної моделі самого обмеження, по-друге, постановки задач накопичення та застосування, по-третє — і це умова науковості всієї конструкції — системи метрик, за якими якість такої системи та точність її компонентів можуть бути оцінені й порівняні. Ці три складові й становлять предмет статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дотичні результати зосереджені в кількох напрямах.

Накопичувальна пам'ять програмних агентів. Напрям активно розвивається з 2024 року. Розрізняють декларативну пам'ять фактів і процедурну пам'ять способів дії; показано, що процедурна складова є вузьким місцем [5; 14]. Запропоновано низку підходів до видобування процедурних знань із траєкторій виконання: ExpeL [20], Agent Workflow Memory [18], Memp [5]; стан напряму узагальнюють огляди [14; 21]. У царині програмної інженерії найближчою є SWE-Exp [2], що накопичує досвід виправлення дефектів із траєкторій агента; загальний огляд мультиагентних систем у програмній інженерії дають He, Treude і Lo [9]. Спільна риса цих робіт: знання видобувають із траєкторій самого агента на еталонних наборах задач, а достовірність накопиченого оцінюють емпірично — часткою правильних спрацювань на тестовій вибірці. Постановок у термінах гарантованих точності та надійності з визначенням потрібного обсягу вибірки не виявлено.

Знання про поведінку інструментів. У роботі Hallinan та співавторів [8] досліджено поведінку агентів за неповної або оманливої документації інструментів і запропоновано механізм ітеративного уточнення документації за фідбеком реальних викликів. Робота розглядає окремий інструмент і працює на синтетичних наборах; поведінка поєднань інструментів, де семантичний розрив виникає на стику, не розглядається.

Ризики еволюційної пам'яті. Виділено три критичні точки відмови систем із пам'яттю, що змінюється: отруєння пам'яті на етапі поглинання, семантичний дрейф під час консолідації та конфлікт при вилученні; на відміну від статичного вилучення, еволюційна пам'ять утворює зворотний зв'язок, у якому помилки накопичуються [6]. Кількісних гарантій проти цих ризиків не запропоновано.

Примусове дотримання обмежень. Розроблено засоби контролю дій агента в реальному часі, зокрема AgentSpec [17], що виконує правила під час виконання. В усіх випадках правила задаються людиною наперед; питання, звідки їх узяти, не ставиться.

Формальний апарат і статистичне підґрунтя. Абстрактні аргументаційні фреймворки [4] дають усталену основу для моделювання ситуацій, у яких коректне виведення скасовується контраргументом; апарат добре вивчений [23], проте до задачі добору обмежень за обмеженого бюджету подання не застосовувався. Апарат точності та надійності оцінювання випадкових процесів у рівномірній метриці [22] дає неасимптотичні гарантії, але до оцінювання достовірності емпіричних знань програмних систем не застосовувався. Щодо встановлення факту використання поданої інформації показано, що текстові пояснення моделей не є надійним свідченням: моделі систематично не згадують чинники, які вплинули на відповідь [15], зі зростанням спроможності вірність міркування знижується [12], розрізнення правдоподібності та вірності пояснення формалізували Jacovi та Goldberg [10], а потребу в причинних перевірках обґрунтували Barez та співавтори [1]. Нарешті, оцінки впевненості мовних моделей є некаліброваними, і методи калібрування розроблені й обчислювально дешеві [7; 11], проте в системах контролю дій агентів пороги, як правило, задаються вручну.

Підсумовуючи: задача накопичення емпіричних обмежень із процесу розробки визнана актуальною, окремі її складові розроблено, проте цілісної постановки, у якій розпізнавання обмежень, оцінювання їх достовірності та обмежене подання розглядаються спільно, немає. Немає, відповідно, і системи метрик, за якою якість систем цього класу могла б оцінюватися й порівнюватися: наявні роботи обмежуються часткою правильних спрацювань на тестовому наборі, що не дає ані гарантій за малої вибірки, ані врахування асиметрії ціни помилки.

Мета статті — формалізувати клас емпіричних обмежень проєктних рішень, поставити задачі системи їх накопичення та застосування й визначити систему метрик, за якою оцінюються якість

такої системи в цілому та точність її компонентів. Завдання: 1) побудувати модель емпіричного обмеження; 2) увести класифікацію режимів відмови за статусом спростовника й показати, що вона зумовлює архітектурне розділення подання та перевірки; 3) сформулювати задачі розпізнавання, оцінювання достовірності та добору обмежень; 4) визначити метрики рівня системи та рівня компонентів і процедури оцінювання точності, включно з причинною процедурою встановлення факту використання поданого обмеження.

Виклад основного матеріалу.

1. Модель емпіричного обмеження. Емпіричним обмеженням називатимемо структуру

$$d = \langle R, O, P, S \rangle,$$

де R — твердження вигляду «у контексті C рішення класу X є неприйнятним»; O — область дії, що визначає межі, у яких твердження чинне; P — підстава: зафіксований випадок або аргумент, з якого твердження походить; S — походження: джерело та момент виникнення, що дають змогу відкликати або переглянути обмеження.

На множині областей дії O задано частковий порядок

$$\text{модуль} \subset \text{репозиторій} \subset \text{продукт} \subset \text{технологічний стек} \subset \text{організація},$$

незалежно від якого існує прив'язка обмеження до версії інструмента або компонента. Частковий порядок є не класифікаційною зручністю, а робочою структурою: саме він робить коректно поставленою задачу узагальнення обмеження з одиничного епізоду (див. п. 3) і визначає, до яких кандидатних дій обмеження застосовне.

За типом підстави P обмеження поділяються на: технічні — властивості системи, інструмента чи середовища; архітектурні конвенції — усталені рішення команди, не зафіксовані документально; організаційні — пріоритети, ресурси, домовленості; хибні — вердикти, які згодом не підтвердилися. Змістовно значущими для перевірки є перші два типи, третій є метаданими, четвертий — шумом; помилка в цій класифікації безпосередньо визначає, чи блокуватиме система правильні рішення.

Таблиця 1 подає приклади обмежень чотирьох типів, видобуті з журналів сесій автоматизованої розробки промислового проєкту; формулювання знеособлені — вилучено назви продукту та організації, технічну механіку кожного випадку збережено.

Таблиця 1

Приклади емпіричних обмежень

№	Твердження R	Область дії O	Тип підстави P	Походження S
1	У MDX-файлах, що містять код Objective-C, стандартне правило markdownlint для розмітки виділення незастосовне: символ * у синтаксисі вказівників воно хибно читає як Markdown-розмітку	Репозиторій	Технічне: хибні спрацювання на перетині лінтера, формату MDX і синтаксису мови — жоден компонент окремо не є дефектним	Журнал сесії: налагодження конвеєра перевірок
2	Якщо корінь Vite перенаштовано на підкаталог src, шлях точки входу /src/main.tsx у index.html неприйнятний: шляхи розв'язуються від налаштованого кореня, правильно — /main.tsx	Репозиторій, доки діє конфігурація	Технічне: неочевидна взаємодія параметра root зі шляхом точки входу	Журнал сесії: відмова локального перегляду
3	Сценарії CI не викликають CLI провайдерів розгортання напряму — лише стабільні скрипти репозиторію	Організація	Архітектурна конвенція: запроваджена після рецензування платформною командою; не задокументована	Гілка рецензування змін
4	Розгортання в промислове середовище заблоковане до появи штатних сценаріїв платформної команди; тимчасовий хостинг як запасний шлях неприйнятний	Продукт	Організаційне: розподіл відповідальності між командами	Журнал сесії: план розгортання
5	Підхід неприйнятний через дефект стороннього компонента	Модуль	Хибне: дефект згодом не підтверджено, вердикт відкликано	Коментар рецензування

Обмеження має життєвий цикл: воно виникає з епізоду відхилення, підтверджується або спростовується подальшими спостереженнями та може втратити чинність — після зміни версії інструмента, рефакторингу або архітектурного рішення — не подаючи жодного сигналу. Так, обмеження 2 з таблиці 1 чинне лише доти, доки діє відповідна конфігурація збирача, а обмеження 4 — до появи штатних сценаріїв розгортання. Тому достовірність і чинність обмеження є не атрибутами, встановленими один раз, а величинами, що підлягають оцінюванню впродовж усього циклу; окремий

підклас становлять обмеження з оголошеною невизначеністю — рішення, свідомо ухвалені на непідтверджених припущеннях, які є кандидатами з найвищим ризиком втрати чинності.

2. Класифікація режимів відмови за статусом спростовника. Ключовою для архітектури системи є класифікація епізодів відхилення за станом, у якому перебував спростовник d у момент ухвалення рішення:

— стан A: обмеження не було в контексті засобу генерації. Порушення усувається постачанням знань — виявленням, накопиченням і поданням обмеження;

— стан B: обмеження було в контексті й не було застосоване. Постачанням не усувається за побудовою: повторне подання того самого змісту тим самим каналом не змінює результату. Потребує окремого проходу перевірки.

Класифікація є двійковою і повністю вимірюваною: присутність обмеження в контексті встановлюється з трас автоматизованої розробки за трьома незалежними шарами — переліком застосованих файлів настанов, який траса фіксує явно; повними аргументами й результатами читань файлів; складом переданих моделі повідомлень. Оскільки траса називає застосовані файли настанов, а самі файли зберігаються у версійованому репозиторії, часткою епізодів стану B серед усіх порушень центральна передумова дослідження перетворюється з аргументу на вимірювану величину.

З класифікації випливає архітектурний наслідок, який у подальшому розглядається не як проєктне вподобання, а як теорема побудови: якщо частка стану B істотна, компонента постачання знань закриває лише частину простору відмов, і перевірка кандидатних дій має бути окремим проходом із власним контекстом — інакше вона успадковує ту саму сліпу зону, що й генерація.

3. Задачі системи накопичення та застосування обмежень. Побудова системи зводиться до трьох задач, кожна з яких у наявній літературі задовільного розв'язання не має.

Задача розпізнавання: у різнорідному потоці природномовних артефактів процесу розробки — обговореннях планів, коментарях рецензування, транскриптах сесій налагодження, описах інцидентів — виявити епізоди, у яких формально коректне рішення відхилено з непрописаної причини, класифікувати підставу P за типом, відновити область дії O та побудувати структуроване подання d. Визначальні умови: сильний дисбаланс класів, відсутність готової розмітки, змішана природномовно-кодова структура тексту й одиниці прикладів на клас, що виводить задачу з режиму навчання на великих корпусах у режим розпізнавання за малою вибіркою зі слабким наглядом.

Задача оцінювання: за неоднорідними спостереженнями — машинними вердиктами конвеєрів, людськими вердиктами рецензування, неявними вердиктами сесій налагодження, кожен із власною невідомою достовірністю, — оцінити ймовірність чинності обмеження в поточний момент та виявити момент втрати чинності. Визначальні умови: одиниці спостережень на обмеження, інформативне цензурування (відсутність спостереження не є свідченням відсутності обмеження), залежність спостережень усередині епізоду.

Задача добору: із накопиченої множини обмежень для кожної кандидатної дії дібрати підмножину в межах спільного бюджету на обсяг подання та затримку так, щоб вердикт щодо прийнятності дії зберігався. Принципова відмінність від семантичного пошуку: шукається не подібність до запиту, а потенційна суперечність із кандидатною дією; обмеження може бути релевантним, не маючи з кандидатом жодної лексичної спільності.

Розв'язання трьох задач збирається в архітектуру перевірки: точка перехоплення на межі побічної дії (а не за добровільним викликом з боку генератора, який ненадійний саме в цільовому режимі відмови); каскад щаблів — добір кандидатних обмежень на кожній дії, перевірка суперечності на короткому списку, формування вердикту з поясненням лише за фактом спрацювання; вирішальне правило з трьома виходами — блокувати, запитати підтвердження, зафіксувати без втручання.

4. Метрики оцінювання якості системи. Система описаного класу втручається в промисловий процес розробки, і ціна її помилок асиметрична: хибне блокування коштує істотно дорожче за пропуск, оскільки призводить до відмови інженерів від використання системи. Крім того, ключові величини оцінюються за малими вибірками, де емпірична частка не має статистичного змісту. Ці дві обставини визначають вимоги до системи метрик: вона має бути дворівневою (якість системи в цілому та точність компонентів), враховувати асиметрію втрат явно та давати гарантовані оцінки замість емпіричних відсотків. Запропонована система метрик зведена в таблиці 2 і розкрита нижче.

Таблиця 2

Система метрик оцінювання якості

Рівень	Метрика	Зміст	Спосіб вимірювання
Система	Частка прийнятних із першого подання	Цільова метрика: частка кандидатних рішень, прийнятих без доопрацювання	Зіставлення до/після впровадження
Система	Повнота перехоплення	Частка епізодів відхилення, у яких систему пред'явлено відповідне обмеження до фіксації дії	Ретроспективне тестування на епізодах
Система	Частка хибних блокувань	Частка втручань, підстава яких не підтвердилася	Реакція інженера на вердикт
Система	Накладні витрати	Затримка на дію (медіана та 95-й процентиль); обсяг поданого контексту на дію	Інструментування трас
Компонент: розпізнавання	Точність, повнота, F-міра	Проти еталонної розмітки; за дисбалансу — площа під кривою «точність–повнота»	Еталонна підвибірка; узгодженість анотаторів (κ)
Компонент: оцінювання	Гарантія ⟨ε, δ⟩	Неасимптотична межа: обсяг вибірки n(ε, δ), достатній для заданих точності й надійності	Апарат оцінювання в рівномірній метриці [22]
Компонент: оцінювання	Калібрування	Відповідність заявленої впевненості емпіричній частоті (Brier, ECE); фактичне покриття інтервалів	Відкладена вибірка
Компонент: добір	Збереження вердикту	Частка ситуацій, де скорочена множина обмежень дає той самий вердикт, що й повна	Контрольоване зіставлення
Компонент: перевіряч	Робоча точка	Крива ROC і точка, що мінімізує очікувані втрати за асиметричної функції втрат	Розмічені епізоди; калібрування [7]
Компонент: подання	Ймовірність спрацювання π	Ймовірність того, що подане чинне обмеження буде застосоване генератором	Контрфактичне вилучення (лабораторний контур)

4.1. Метрики рівня системи. Цільовою метрикою є частка прийнятних із першого подання рішень: саме її підвищення є метою побудови системи, і саме вона безпосередньо спостережувана в промисловому процесі. Повнота перехоплення та частка хибних блокувань утворюють пару, що описує якість втручання; їх згортання в один показник виконується не симетричною F-мірою, а очікуваними втратами з асиметричною функцією втрат, у якій вартість хибного блокування призначається істотно вищою за вартість пропуску. Робоча точка вирішального правила визначається мінімізацією цих втрат, а не максимізацією симетричної точності — це принципова відмінність від прийнятої в роботах з пам'яті агентів практики звітувати частку правильних спрацювань. Накладні витрати вимірюються окремо за щаблями каскаду, оскільки перший і другий щаблі працюють у режимі жорсткого обмеження часу, а третій — ні.

4.2. Метрики рівня компонентів. Для задачі розпізнавання застосовні класичні метрики якості класифікації проти еталонної розмітки, з двома застереженнями: за сильного дисбалансу класів змістовною є площа під кривою «точність–повнота», а не частка правильних відповідей; еталонна розмітка сама має контрольовану якість, яка вимірюється узгодженістю незалежних анотаторів (коефіцієнт κ) на спільній підвибірці.

Для задачі оцінювання достовірності центральною метрикою є не точкова похибка, а гарантія вигляду

$$\mathbf{P}\{\sup_{t\in[0,T]} |\hat{\theta}_n(t) - \theta(t)| > \varepsilon\} \le \delta,$$

де θ(t) — ймовірність чинності обмеження в момент t, $\hat{\theta}_n$ — її оцінка за n спостереженнями. Змістовним результатом є неасимптотична оцінка n(ε, δ) — обсяг вибірки, достатній для заданих точності ε та надійності δ; оцінка потрібна саме в рівномірній метриці, оскільки момент застосування обмеження наперед невідомий і поточкової гарантії недостатньо [22]. Додатково вимірюється калібрування ймовірнісних оцінок: відповідність заявленої впевненості емпіричній частоті на відкладеній вибірці (оцінка Браєра, очікувана похибка калібрування) та фактичне покриття довірчих інтервалів. Некаліброваність оцінок сучасних моделей є документованим явищем [7; 11], тому порогове правило поверх сирих значень статистичного змісту не має.

Для задачі добору метрикою є збереження вердикту: частка перевірюваних ситуацій, у яких вердикт за скороченою множиною обмежень збігається з вердиктом за повною, за досягнутого коефіцієнта стиснення бюджету подання. Для перевіряча — положення робочої точки на кривій ROC за асиметричної функції втрат і затримка;

окремо порівнюються класи моделей перевіряча, оскільки задача виявлення суперечності між двома текстами не потребує породження й не передбачає наперед, що її має розв'язувати мовна модель загального призначення.

4.3. Процедури оцінювання точності. Перелічені метрики мають сенс лише за коректної процедури вимірювання. Пропонуються чотири процедури, що покривають різні компоненти.

Перша — ретроспективне тестування на епізодах відхилення. Кожен зафіксований в історії розробки епізод, у якому формально коректне рішення було відхилено із зазначеною підставою, утворює готовий тестовий випадок: дано контекст і кандидатне рішення — чи пред'явить система підставу до фіксації дії. Суттєво, що для ретроспективного матеріалу наслідки кожного епізоду вже відомі: повторюваність відхилення, подальший інцидент або подальше ухвалення раніше відхиленого рішення дають розмітку, яку в поточному спостереженні довелося б чекати місяцями.

Друга — еталонна підвибірка з безпосередньо спостережуваним індикатором. Величини, які в промисловій обстановці спостерігаються лише опосередковано (передусім факт присутності та факт використання обмеження), у лабораторному контурі на моделях із відкритими вагами спостерігаються прямо. Це дає перевірку оцінювача за еталоном: чи відновлює процедура, побудована без прямого спостереження величини, те саме значення, яке дає безпосереднє вимірювання. Ідентифіковність моделі оцінювання перевіряється, а не постулюється.

Третя — контрфактичне вилучення як причинний тест факту використання. Прогін із обмеженням у контексті зіставляється з прогоном без нього; відсутність розбіжності вихідних розподілів означає, що обмеження не використовувалося попри присутність. Процедура потрібна тому, що текстові пояснення моделей не є надійним свідченням фактичного використання: моделі систематично не згадують чинники, які вплинули на відповідь [15], а вірність міркування знижується зі зростанням спроможності [12]; розрізнення правдоподібності та вірності формалізовано в працях [10; 1]. Контрфактичне вилучення замінює тлумачення згенерованого тексту прямим вимірюванням і дає оцінку ймовірності спрацювання π як регресійної залежності від характеристик подання — каналу, позиції в контексті, обсягу супровідних настанов, кількості конкурентних обмежень.

Четверта — зіставлення до/після на промисловому матеріалі: контрольний зріз метрик рівня системи до впровадження та повторний зріз після, з фіксацією загроз валідності (неоднорідність задач, ефект навчання команди, зміщення вибірки в бік діалогової та агентної роботи). За малих вибірок статистична значущість установлюється неасимптотичними межами, узгодженими з п. 4.2, а не асимптотичними критеріями.

Висновки.

1. Введено модель емпіричного обмеження проєктного рішення як структури $\langle R, O, P, S\rangle$ — твердження, область дії, підстава, походження — із частковим порядком на областях дії та життєвим циклом, що включає втрату чинності без сигналу; модель проілюстровано обмеженнями, видобутими з журналів промислової розробки.

2. Введено класифікацію режимів відмови засобів автоматизованої генерації за статусом спростовника в момент ухвалення рішення; показано, що стани «обмеження відсутнє» та «обмеження присутнє й не застосоване» потребують неперетинних механізмів усунення, звідки випливає архітектурне розділення постачання знань і перевірки рішень.

3. Сформульовано три задачі системи накопичення та застосування обмежень — розпізнавання за малою вибіркою зі слабким наглядом, оцінювання достовірності й чинності за неоднорідними цензурованими спостереженнями, добір за спільного бюджету подання й затримки зі збереженням вердикту.

4. Запропоновано дворівневу систему метрик, у якій рівень системи описується часткою прийнятних із першого подання рішень, повнотою перехоплення та часткою хибних блокувань за явно асиметричної функції втрат, а рівень компонентів — гарантіями точності й надійності вигляду $\langle \varepsilon, \delta\rangle$, калібруванням оцінок, збереженням вердикту при доборі та ймовірністю спрацювання поданого обмеження.

5. Визначено процедури оцінювання точності: ретроспективне тестування на епізодах відхилення, перевірку оцінювачів за еталонною підвибіркою, контрфактичне вилучення як причинний тест факту використання та зіставлення до/після з неасимптотичним установленням значущості.

Подальші дослідження спрямовано на вимірювання емпіричного розподілу режимів відмови на промисловому матеріалі, розроблення методів розпізнавання та оцінювання за сформульованими постановками й експериментальну перевірку достатнього класу моделі перевіряча.

References

1. Barez F., Wu T.-Y. et al. Chain-of-Thought Is Not Explainability. Oxford AI Governance Initiative, 2025.

2. Chen S., Lin S., Shi Y. et al. SWE-Exp: Experience-Driven Software Issue Resolution. 2026. arXiv:2507.23361.

3. Constraint Decay: The Fragility of LLM Agents in Backend Code Generation. 2026. arXiv:2605.06445.

4. Dung P. M. On the acceptability of arguments and its fundamental role in nonmonotonic reasoning, logic programming and n-person games. Artificial Intelligence. 1995. Vol. 77, № 2. P. 321–357.

5. Fang R., Liang Y., Wang X. et al. Memp: Exploring Agent Procedural Memory. 2025. arXiv:2508.06433.

6. Governing Evolving Memory in LLM Agents: Risks, Mechanisms, and the Stability and Safety Governed Memory Framework. 2026. arXiv:2603.11768.

7. Guo C., Pleiss G., Sun Y., Weinberger K. Q. On Calibration of Modern Neural Networks. Proc. 34th International Conference on Machine Learning. 2017. arXiv:1706.04599.

8. Hallinan S., Venkatesh T., Ren X. et al. OpaqueToolsBench: Learning Nuances of Tool Behavior Through Interaction. 2026. arXiv:2602.15197.

9. He J., Treude C., Lo D. LLM-Based Multi-Agent Systems for Software Engineering: Literature Review, Vision and the Road Ahead. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2025. Vol. 34, № 5. P. 1–30.

10. Jacovi A., Goldberg Y. Towards Faithfully Interpretable NLP Systems: How Should We Define and Evaluate Faithfulness? Proc. 58th Annual Meeting of the ACL. 2020. P. 4198–4205.

11. Kadavath S., Conerly T., Askell A. et al. Language Models (Mostly) Know What They Know. 2022. arXiv:2207.05221.

12. Lanham T., Chen A., Radhakrishnan A. et al. Measuring Faithfulness in Chain-of-Thought Reasoning. 2023. arXiv:2307.13702.

13. Liu N. F., Lin K., Hewitt J. et al. Lost in the Middle: How Language Models Use Long Contexts. Transactions of the Association for Computational Linguistics. 2024. Vol. 12. P. 157–173.

14. Memory for Autonomous LLM Agents: Mechanisms, Evaluation, and Emerging Frontiers. 2026. arXiv:2603.07670.

15. Turpin M., Michael J., Perez E., Bowman S. R. Language Models Don't Always Say What They Think: Unfaithful Explanations in Chain-of-Thought Prompting. Advances in Neural Information Processing Systems 36. 2023. arXiv:2305.04388.

16. Vasilevski K., Dong X., Rombaut B. et al. Beyond Correctness: Enhancing Architectural Reasoning in Code LLMs via Scalable Labeling with Agentic Judgment. 2026. arXiv:2606.14948.

17. Wang H., Poskitt C. M., Sun J. AgentSpec: Customizable Runtime Enforcement for Safe and Reliable LLM Agents. Proc. IEEE/ACM 48th International Conference on Software Engineering (ICSE '26). Rio de Janeiro, 2026. arXiv:2503.18666.

18. Wang Z. Z., Mao J., Fried D., Neubig G. Agent Workflow Memory. 2024. arXiv:2409.07429.

19. Zhang Z. Comprehension Without Competence: Architectural Limits of LLMs in Symbolic Computation and Reasoning. 2025. arXiv:2507.10624.

20. Zhao A., Huang D., Xu Q. et al. ExpeL: LLM Agents Are Experiential Learners. Proc. AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2024. Vol. 38, № 17. P. 19632–19642.

21. Zhou C., Chai H., Chen W. et al. Externalization in LLM Agents: A Unified Review of Memory, Skills, Protocols and Harness Engineering. 2026. arXiv:2604.08224.

22. Козаченко Ю. В., Пашко А. О. Точність і надійність моделювання випадкових процесів та полів в рівномірній метриці: монографія. Київ: ТОВ «СІК ГРУП Україна», 2016. 216 с.

23. Кривий С. Л., Провотар О. І. Вступ до некласичної логіки. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2010.

No 191 (191) (2026)

The scientific heritage
(Budapest, Hungary)
The journal is registered and published in Hungary.
The journal publishes scientific studies, reports and reports about achievements in different scientific fields.
Journal is published in English, Hungarian, Polish, Russian, Ukrainian, German and French.
Articles are accepted each month.
Frequency: 24 issues per year.
Format - A4
ISSN 9215 — 0365

All articles are reviewed
Free access to the electronic version of journal
Edition of journal does not carry responsibility for the materials published in a journal.
Sending the article to the editorial the author confirms it's uniqueness and takes full responsibility for possible consequences for breaking copyright laws

Chief editor: Biro Krisztian
Managing editor: Khavash Bernat

- Singula Aleksandra - Professor, Department of Organization and Management at the University of Zagreb (Zagreb, Croatia)
- Bogdanov Dmitrij - Ph.D., candidate of pedagogical sciences, managing the laboratory (Kiev, Ukraine)
- Chukurov Valeriy - Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Biochemistry of the Faculty of Physics, Mathematics and Natural Sciences (Minsk, Republic of Belarus)
- Torok Dezso - Doctor of Chemistry, professor, Head of the Department of Organic Chemistry (Budapest, Hungary)
- Filipiak Pawel - doctor of political sciences, pro-rector on a management by a property complex and to the public relations (Gdansk, Poland)
- Flater Karl - Doctor of legal sciences, managing the department of theory and history of the state and legal (Koln, Germany)
- Bence Orban - Doctor of sociological sciences, professor of department of philosophy of religion and religious studies (Miskolc, Hungary)
- Feld Ella - Doctor of historical sciences, managing the department of historical informatics, scientific leader of Center of economic history historical faculty (Dresden, Germany)
- Owczarek Zbigniew - Doctor of philological sciences (Warsaw, Poland)
- Gál Jenő - MD, assistant professor of history of medicine and the social sciences and humanities (Budapest, Hungary)
- Borbély Kinga - Ph.D, Professor, Department of Philosophy and History (Kosice, Slovakia)
- Eberhardt Mona - Doctor of Psychology, Professor, Chair of General Psychology and Pedagogy (Munich, Germany)
- Kramarchuk Vyacheslav - Doctor of Pharmacy, Department of Clinical Pharmacy and Clinical Pharmacology (Vinnytsia, Ukraine)

«The scientific heritage»
Editorial board address: Budapest, Kossuth Lajos utca 84,1204
E-mail: public@tsh-journal.com
Web: www.tsh-journal.com